

Jesse Ketonen

# LTE-A:n kolmen kanta-aallon yhdistäminen DL-tiedonsiirrossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikka

Insinöörityö

16.11.2017

Tekijä(t) Otsikko	Jesse Ketonen LTE-A:n kolmen kantoaallon yhdistäminen DL-tiedonsiirrossa
Sivumäärä Aika	55 sivua 16.11.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoverkot
Ohjaaja(t)	Tero Nurminen, Yliopettaja Sami Virtala, Department Manager
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli havainnollistaa LTE- sekä LTE-A-teknologioiden toimintaperiaate radorajapinnan suhteen, mitkä tekniikaltaan tukevat ja tekevät mahdolliseksi työn varsinaisen aiheen, kantoaaltojen yhdistämisen (Carrier Aggregation, CA) matkapuhelinverkossa. LTE-A-teknologian merkittävimpänä ominaisuutena kantoaaltojen yhdistäminen tuo huomattavasti suurempia nopeuksia matkapuhelimen lähetys- ja vastaanottotiedonsiirroissa kapasiteetin parantamisen lisäksi.</p> <p>Työssä tutustuttiin kantoaaltojen yhdistämisen tekniikkaan ja sen vaikutuksista radioverkon eri rajapintoihin sekä toteutettiin käytännön suorituskvyn mittauksia marraskuussa 2017 LTE-A-verkossa. Mittauksissa keskityttiin vastaanoton (Downlink, DL) tiedonsiirtoon kolmella kantoaallolla hyödyntäen myös muita tiedonsiirtoon vaikuttavia LTE-A-teknologian ominaisuuksia, kuten moniantennitekniikkaa (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) sekä QAM-modulaatioita (Quadrature Amplitude Modulation).</p> <p>Verkon mittauksia tehtiin yhdellä, kahdella sekä kolmella kantoaallolla, jotta pystyttiin ilmaisemaan suorituskvymittareita hyödyntäen yhdistettävien kantoaaltojen merkitystä CA-tiedonsiirrossa. Käyttökvyymittauksista voitiin huomata teoreettisten nopeuksien poikkeavan käytännön eli loppukäyttäjän kokemista nopeuksista. Silti pystyttiin havaitsemaan huomattavaa tiedonsiirrossa konkretisoituvaa etua CA-ominaisuuden käytössä ja mahdollisuuksissa, millä pystytään täyttämään käyttäjien jatkuvasti kasvavia vaatimuksia matkapuhelinlaajakaistan käytössä.</p>	
Avainsanat	Kantoaaltojen yhdistäminen, LTE, LTE-A, CA, 3CC

Author(s) Title	Jesse Ketonen LTE-A DL 3CC Carrier Aggregation
Number of Pages Date	55 pages 16 November 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Data Networks
Instructor(s)	Dr. Tero Nurminen, Principal Lecturer Sami Virtala, Department Manager
<p>The purpose of the thesis was to illustrate the operations of LTE and LTE-A technologies in the radio interface, both technologies enables Carrier Aggregation (CA), which is the actual subject of this thesis. As the most important feature of LTE-A technology, the Carrier Aggregation brings significantly higher throughputs to downlink and uplink data transfers in addition to capacity enhancement.</p> <p>Technology of Carrier Aggregation was studied and its effects on the different interfaces of the radio network. Practical performance measurements were performed in the LTE-A network in November 2017. The performance measurements focused on downlink throughput with three carriers, utilizing also other LTE-A technology features such as Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) and QAM modulation (Quadrature Amplitude Modulation).</p> <p>Network measurements were performed with one, two and three carriers in order to be able to demonstrate the importance of combining carriers in CA data transfer using Key Performance Indicators (KPI). The difference between theoretical and practical throughputs experienced by the end user could be seen from the performance measurements. Nevertheless, it was possible to detect a significant concrete advantage and potential in data transfers when CA feature is enabled, which makes it possible to meet the increasing demands of end users in the use of mobile broadband.</p>	
Keywords	Carrier Aggregation, LTE, LTE-A, CA, 3CC

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	LTE	2
2.1	Evolved Packet System	3
2.1.1	UE	4
2.1.2	Evolved Node B	4
2.1.3	Evolved Packet Core	5
2.2	Fyysinen kerros	7
2.2.1	OFDMA	7
2.2.2	SC-FDMA	9
2.2.3	MIMO	10
2.2.4	Modulaatio	11
2.3	Radioprotokolla-arkkitehtuuri	12
2.3.1	Control Plane	14
2.3.2	User Plane	15
2.4	Kanavarakenne	16
2.4.1	Fyysiset kanavat	17
2.4.2	Siirtokanavat	18
2.4.3	Loogiset kanavat	19
3	LTE-Advanced	20
3.1	UE-kategorialuokitukset	21
3.2	Paranneltu MIMO-tekniikka	23
3.3	Relay Node -tukiasemat	25
3.4	Coordinated Multipoint	27
3.5	Heterogeeniset verkkoratkaisut ja eICIC	28
4	Kantoaaltojen yhdistäminen	31
4.1	Kantoaaltojen yhdistämisen peruseriaate	31
4.2	Component Carrier -kantaaallot	32
4.3	Carrier Aggregation -variaatiot	33
4.4	Käyttöönottoskenaariot	34
4.5	Kaistakombinaatiot	36
4.6	Vaikutukset korkeampien kerroksien radioprotokolliin	38

4.7	Kantoaaltojen yhdistämisen fyysinen kerros	38
4.7.1	Downlink	38
4.7.2	Uplink	39
4.8	Mobiliteetti	40
4.9	Suorituskyky	41
5	Suorituskykymittaukset	42
5.1	Tekniikka ja menetelmät	42
5.2	Käytännön mittaukset	43
5.2.1	Yhden kantaallon mittaus	43
5.2.2	Kahden kantaallon mittaus	45
5.2.3	Kolmen kantaallon mittaus	48
5.3	Mittaustulosten arviointi	50
6	Yhteenveto	52
	Lähteet	53

## Lyhenteet

3GPP	<i>Third Generation Partnership Project.</i> Standardointijärjestön yhteistyöorganisaatio.
ABS	<i>Almost Blank Subframe.</i> eCIC-tekniikassa häiriöiden vähentämiseen käytettävä alikehys.
ARQ	<i>Automatic Repeat Request.</i> Tiedonsiirrossa käytettävä virheohjausmenetelmä.
BER	<i>Bit Error Rate.</i> Virheellisten bittien osuus kaikista siirretyistä biteistä.
CA	<i>Carrier Aggregation.</i> LTE-Advanced-teknologian ominaisuus, jolla lisätään tiedonsiirtoon käytettyä kaistanleveyttä.
CB	<i>Coordinated Beamforming.</i> CoMP-ominaisuuden DL-tiedonsiirrossa käytettävä menetelmä.
CC	<i>Component Carrier.</i> Carrier Aggregation -ominaisuudessa käytetty yksittäinen kantoaalto.
CIF	<i>Carrier Indicator Field.</i> Käytetään osoittamaan vuoronnnettujen resurssien sijainteja.
CoMP	<i>Coordinated Multipoint.</i> LTE-A:n ominaisuus optimaalisen suorituskyvyn parantamiseksi.
CP	<i>Control Plane.</i> Ohjaustason signalointiyhteys.
CP	<i>Cyclic Prefix.</i> Symbolijaksojen välissä käytetty suoja-aika.
CQI	<i>Channel Quality Indicator.</i> Tiedonsiirtokanavan laadun tietoja kantava indikaattori.
CRS	<i>Cell-Specific Reference Signal.</i> Solukohtainen referenssisignaali.

CS	<i>Coordinater Scheduling</i> . CoMP-ominaisuuden DL/UL-tiedonsiirrossa käytetty menetelmä.
CSD	<i>Circuit Switched Data</i> . Piirikytkentäinen data.
CSG	<i>Closed Subscriber Groups</i> . Femto-eNB-tukiasemaan pääsyn omaava käyttäjäryhmä.
CSI-RS	<i>Channel State Information Reference signal</i> . Siirtokanavan laadun raportoimiseen käytetty referenssisignaali.
DCI	<i>Downlink Control Information</i> . Kontrolloi resurssien allokointia fyysisessä kerroksessa.
DeNB	<i>Donor eNodeB</i> . Relay Node -tukiasemaa palveleva eNodeB.
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> . Diskreetti fourier-muunnos.
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> . IP-osoitteita jakava verkkoprotokolla.
eICIC	<i>Enhanced Inter-Cell Interference Coordination</i> . eNB-tukiasemien välisten häiriöiden vähentämiseen käytetty ominaisuus.
eNodeB	<i>Evolved Node B</i> . LTE-teknologiaa tukeva tukiasema.
EPC	<i>Evolved Packet Core</i> . LTE-teknologian runkoverkko.
EPS	<i>Evolved Packet System</i> . E-UTRAN- sekä EPC-verkko-osuuksien muodostama arkkitehtuuri.
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Access Network</i> . LTE-teknologian radioverkko-osuus.
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i> . Langattomissa DL- ja UL-tiedonsiirrossa käytetty taajuusjakoinen tekniikka.

FDM	<i>Frequency Division Multiplexing.</i> Taajuuskanavointi, jossa signaaleilla on omat taajuuskaistansa.
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i> Nopea Fourier-muunnos.
GSM	<i>Global System for Mobile Communications.</i> Toisen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
GTP	<i>GPRS Tunneling Protocol.</i> GPRS-tunnelointiprotokolla.
GTP-C	<i>GPRS Tunnel Protocol-Control Plane.</i> GPRS-tunnelointiprotokolla Control Plane -signaalintyyhteyttä varten.
GTP-U	<i>GPRS Tunnel Protocol-User Plane.</i> GPRS-tunnelointiprotokolla User Plane -tunnelointiyhteyttä varten.
HARQ	<i>Hybrid ARQ.</i> Automatisoitujen uudelleenlähetyspyyntöjen käsittelyyn käytetty menetelmä.
HeNB	<i>Home eNodeB.</i> Sisäkuuluvuuden parantamiseen käytetty matalatehoinen tukiasema.
HetNet	<i>Heterogeneous Networks.</i> Heterogeeniset verkkoratkaisut.
HSPA	<i>High-Speed Packet access.</i> Matkaviestinten yhteyskäytäntö.
HSS	<i>Home Subscriber Server.</i> Kotipaikkarekisteri.
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform.</i> Käänteinen diskreetti Fourier-muunnos.
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform.</i> Käänteinen, nopea Fourier-muunnos.
IMS	<i>IP Multimedia Sub-System.</i> IP-yhteyden ja palvelun ohjausarkkitehtuuri monenlaisille multimediapalveluille.



IMT-A	<i>International Mobile Telecommunications Advanced</i> . ITU-R:n muodostama määritelmä neljännen sukupolven matkapuhelinverkkotekniikalle.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> . YK:n mobiiliviestinnän standardointia hoitava järjestö.
ITU-R	<i>International Telecommunication Union Radiocommunication Sector</i> . Radioliikenteen standardeja määrittelevä ITU-järjestön sektori.
JR	<i>Joint Reception</i> . CoMP-ominaisuuden UL-tiedonsiirtomenetelmä.
JT	<i>Joint Transmission</i> . CoMP-ominaisuuden DL-tiedonsiirtomenetelmä.
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> . Suorituskykymittari.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> . Edistynyt 3G-tekniikka, kutsutaan myös 4G:ksi.
LTE-A	<i>Long Term Evolution – Advanced</i> . Varsinainen neljännen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i> . Tiedonsiirtoon käytetty moniantennitekniikka.
MME	<i>Mobility Management Entity</i> . LTE-verkon ohjauksen yhteyspiste.
MU-MIMO	<i>Multi-User MIMO</i> . MIMO-tila, jossa rinnakkaiset datavirrat siirretään tilallisesti erotetuille päätelaitteille.
NAS	<i>None-Access Stratum</i> . Joukko protokollia EPS-arkkitehtuurissa.
OCC	<i>Orthogonal Cover Codes</i> . Taajuusresurssien jaossa käytetty koodimenetelmä.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> . DL-suunnan taajuuskanaointi.

PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i> . Arvo huippu- sekä keskimääräisentehon vaihtelulle.
PAR	<i>Peak-to-Average Ratio</i> . Arvo huonolaatuisten kanavien tunnistamiseen.
PCC	<i>Primary Component Carrier</i> . RRC-yhteyttä ja mobiliteettia hallitseva CC-kantoaalto.
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i> . Ohjelmistosolmu, joka vastaa verkon toimintaperiaatteista sekä laskutuksesta.
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> . User- sekä Control Plane -yhteyksissä käytettävä radioprotokolla.
PDN	<i>Packet Data Network</i> . Ulkoinen IP-verkko.
PDP	<i>Packet Data Protocol</i> . Protokolla tilaajan tietojen organisoimiseen.
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> . Verkkokerroksen tuottamat paketit.
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i> . EPC- sekä PDN-verkkojen välinen yhdyskäytävä.
PHY	<i>Physical Layer</i> . Tarkoittaa radiotekniikassa ilmarajapintaa.
PSD	<i>Packet Switched Data</i> . Pakettikytkentäinen mobiiliverkkoyhteys.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> . Modulointitekniikka.
QoS	<i>Quality of Service</i> . Datansiirron priorisointitekniikka.
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> . Modulointitekniikka (4-QAM).
OSG	<i>Open Subscriber Group</i> . Avoin käyttäjäryhmä femto-eNB -tukiasemalle.
RB	<i>Radio Bearer</i> . Päätelaitteen datan ja signaloinnin käsittelyn virtuaalinen käsite.

RB	<i>Resource Block.</i> Taajuuskanavointii käytetty resurssilohko.
RE	<i>Range Extension.</i> Tekniikka, jolla siirretään käyttäjiä pienempiin soluihin.
RLC	<i>Radio Link Control.</i> Radioyhteyttä kontrolloiva protokolla.
RN	<i>Relay Node.</i> Pienitehoinen tukiasema.
RRH	<i>Radio Remote Head.</i> Komponentti radioverkon kapasiteetin lisäämiseen.
RRC	<i>Radio Resource Control.</i> Protokolla radioresurssien käytölle.
RSRP	<i>Reference Signal Received Power.</i> Ilmaisee referenssisignaalin tason.
RSRQ	<i>Reference Signal Received Quality.</i> Ilmaisee referenssisignaalin laadun.
S1AP	<i>S1 Application Protocol.</i> S1-rajapinnassa toimiva protokolla.
SCC	<i>Secondary component carrier.</i> Toissijainen CC-kantoaalto.
SC-FDMA	<i>Single-Carrier Frequency Division Multiple Access.</i> Mobiililaitteesta verkkoon -suunnan digitaalinen modulointitekniikka.
SCTP	<i>Stream Control Transmission Protocol.</i> Kuljetusprotokolla signaalointiviestien kuljettamiseen.
SDU	<i>Service Data Unit.</i> Verkkokerrokseen saapuvat paketit.
S-GW	<i>Serving Gateway.</i> Yhdyskäytävä pakettidatan reititykseen.
SIP	<i>Session Initiation Protocol.</i> Tietoliikenneprotokolla, esim. IP-puheluille.
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio.</i> Signaali-kohinasuhteen indikaattori.
SU-MIMO	<i>Single-User MIMO.</i> MIMO-tila, jossa rinnakkaiset datavirrat lähetetään yksittäiselle päätelaitteelle.

TA	<i>Tracking Area.</i> Päätelaitteen jäljittämiseen käytettävissä oleva alue.
TB	<i>Transport Block.</i> Siirtolohko.
TCP	<i>Transmission Control Protocol.</i> Tiedonsiirtoprotokolla.
TDD	<i>Time Division Duplex.</i> Langattomissa DL- ja UL-tiedonsiirroissa käytetty aikajakoinen tiedonsiirtotekniikka.
TM	<i>Transmission mode.</i> MIMO-tekniikassa käytetty esikoodauksen siirtotila.
TPC	<i>Transmit power control.</i> Hallinnoi tehonsäätöä.
UDP	<i>User Datagram Protocol.</i> Tiedonsiirtoprotokolla.
UE	<i>User Equipment.</i> Päätelaitte.
UICC	<i>Universal Integrated Circuit Card.</i> Päätelaitteeseen liitettävä älykortti.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System.</i> Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
UP	<i>User Plane.</i> Tunnelointiyhteys.
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module.</i> Päätelaitteen älykortin (UICC) sovellus, jolla tunnistetaan tilaaja sekä suojataan radiorajapinnan liikenne.
VoIP	<i>Voice over IP.</i> Puheliikenne pakettikytkentäisessä verkossa.
VoLTE	<i>Voice over Long-Term Evolution.</i> LTE-puhelut mahdollistava tekniikka.

## 1 Johdanto

Matkapuhelinverkot sekä matkapuhelimet itsessään ovat kokeneet räjähdysmäisen kehityksen viimeisen yli kymmenen vuoden aikana. Vuonna 2016 matkapuhelinverkot peittivät seitsemän miljardin ihmisen asuinalueen eli noin 95 % maailman väestöstä. Third Generation Partnership Project -järjestön (3GPP) standardisoima Long Term Evolution (LTE) julkaistiin joulukuussa 2009, ja seitsemän vuotta myöhemmin verkon peittoalue mahdollisti lähes neljälle miljardille ihmiselle LTE-verkon käytön. [1.]

Hurjan kehityksen vuoksi vaaditaan operaattoreilta jatkuvaa suunnittelua sekä palveluiden laadun parantamista, jotta päästään käyttäjien jo aikaisemmin kiinteän laajakaistan kautta kokemaan suorituskykyyn. Tarve mobiiliverkon käytölle näkyy myös matkapuhelinoperaattorin, Elisan asiakkaiden mobiilidatan käytössä. Elokuussa 2016 Elisan asiakkaat käyttivät keskimäärin 13 gigatavua mobiilidataa, joka selittyy muun muassa nykyisin suuressa suosiossa olevalla suoratoistamisella mobiililaitteilla. Suositun LTE-verkon datavolyymi kasvoi vuoden aikana tällä suomalaisella operaattorilla yli 110 prosenttia. [2.]

Kehityksen aallonharjalla on LTE-Advanced (LTE-A), LTE-teknologian kehittyneempi versio, jonka ensimmäinen määrittely Release 10 julkaistiin 3GPP:n toimesta joulukuussa 2010 [3, s. 487–488]. Release 10:n sekä LTE-A:n merkittävin uudistus oli Carrier Aggregation (CA) -ominaisuus, joka hyödyntää edistyneesti moniantennitekniikoita. Carrier Aggregation käyttää vähintään kahta yksittäistä kantaaltoa (Carrier Component, CC) aina mahdolliseen viiteen kantaaltoon asti. CA-tekniikan ansiosta päätelaite (User Equipment, UE) pystyy lataamaan sekä lähettämään dataa jopa moninkertaisella nopeudella verrattuna edeltäviin 3GPP Release -määrittelyihin. [4.]

Tämän insinööritoiminnan aiheena downlink-suunnan (DL) kolmen kantaallon Carrier Aggregation -tekniikka (DL 3CC CA), joka mahdollistaa spektristä tehokkuutta päätelaitteiden downlink-kommunikointiin. Työssä käydään läpi teoria DL 3CC CA -ominaisuuden mahdollistamista tekniikoista sekä tehdään mittauksia käytännössä, joista voidaan tehdä johtopäätöksiä käyttämällä oleellisia suorituskykymittareita (Key Performance Indicator, KPI). Työn tavoitteena on käytännössä tehtävien kantaaltojen yhdistämisen mittauksilla osoittaa CA-ominaisuuden hyödyt mobiiliverkosta päätelaitteelle saatavissa tiedonsiirtonopeuksissa.

## 2 LTE

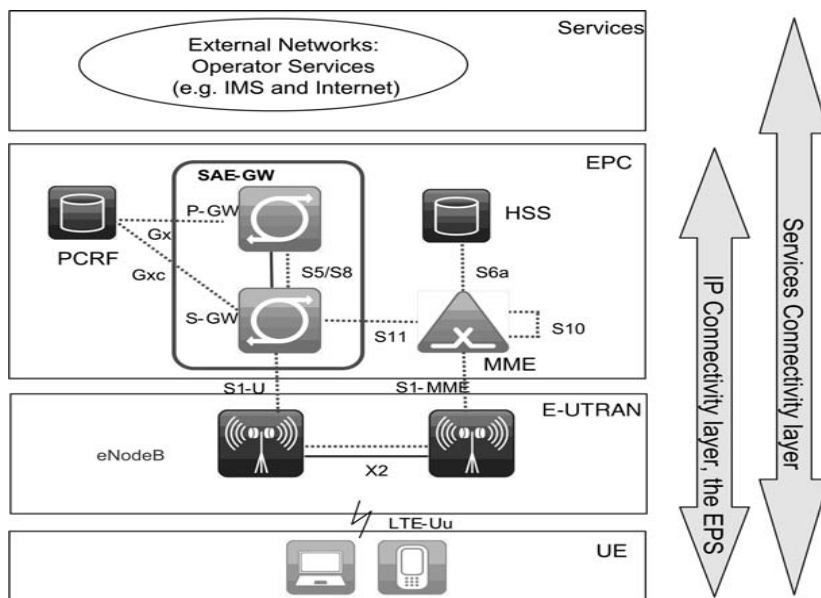
Toisen sukupolven (Global System for Mobile Communications, GSM) sekä kolmannen sukupolven (Universal Mobile Telecommunication System, UMTS) mobiiliteknologioiden standardeista kehitetty, langattoman tiedonsiirron LTE-verkko on täysin pakettikytkentäinen (Packet Switched Data, PSD). LTE-verkossa puheliikenteen suorittaa VoIP (Voice over IP) mahdollistaen integroinnin multimediaspalveluiden kanssa. UMTS-teknologian suorituskyypäivitys HSPA (High-Speed Packet Access) oli ensimmäinen askel kohti nopeampaa tiedonsiirtoa, mikä lisäsi mobiilidatan käyttöä nousujohteisesti johdattaen tarpeeseen seuraavan sukupolven verkkoteknologialle. 3GPP:n standardisoima LTE-teknologia saatiin ominaisuuksiltaan valmiiksi sekä julkaistiin Release 8 -määrittelyn myötä, jonka tärkeimpinä vaatimuksina oli korkea huippunopeus datansiirrossa, pieni vasteaika, kapasiteetti sekä joustavuus taajuuksissa ja kaistanleveydessä.

LTE-teknologialle asetetut vaatimukset johtivat kokonaan uuden verkkoarkkitehtuurin EPS (Evolved Packet System) suunnitteluun. Pienemmät viiveet sekä kustannukset verkon rakentamiseen saatiin vähentämällä verkkoelementtejä eli verkkoarkkitehtuurin matalamisella. GSM- sekä UMTS-arkkitehtuureissa käytetään erillisenä verkkoelementtinä radioverkko-ohjainta, joka ohjaa sille määritetyn maantieteellisen alueen tukiasemia vastaten yhteyden laadusta sekä solunvaihtoista. Suuri muutos LTE-verkkoon tulleesta arkkitehtuurimuutoksesta on radioverkko-ohjaimen sisällyttäminen LTE-teknologiakykyiseen tukiasemaan (Evolved Node B, eNodeB), minkä seurauksena liityntä verkkoon on nopeampaa sekä saadaan matalampi viive verkon käytössä.

Korkeita datansiirtonopeuksia sekä parempaa spektritehokkuutta saadaan jakamalla kaistaa aika- ja taajuustasossa. Kaistanleveyksiä voidaan valita 1,4 MHz:n ja 20 MHz:n väliltä riippuen saatavilla olevasta spektristä. Teoriassa voidaan saavuttaa jopa 300 Mb/s:n downlink-tiedonsiirtonopeuksia, uplink-suuntaan 75 Mb/s sekä 2-4 -kertainen spektritehokkuus verrattuna UMTS-teknologiaan. [3, s. 5-6; 5.]

## 2.1 Evolved Packet System

Evolved Packet System sisältää radorajapinnan E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Access Network) sekä runkoverkon EPC (Evolved Packet Core), jotka optimoivat täysin IP-pohjaisen verkkoteknologian. Kuvassa 1 havainnollistetaan EPS-arkkitehtuuria, verkkotasoa sekä miten päätelaite (UE) reititetään runkoverkkoon. Services- sekä UE-tasot eivät ole muuttuneet verrattuna aikaisempiin, toisen sekä kolmannen sukupolven teknologioihin. Muutokset verkkoelementeissä on tapahtunut E-UTRAN-verkkoosuudessa sekä EPC-runkoverkossa.



Kuva 1. Evolved Packet System -arkkitehtuuri [6, s. 18].

Puheliikenteenkin ollessa pakettikytkentäinen, tarvitaan IP-puheluiden tuottamiseen IP Multimedia -järjestelmää (IP Multimedia Sub-System, IMS). [7.] IMS-järjestelmällä voidaan luoda VoIP-puheluita (Voice over IP) ja lisäksi mahdollistetaan yhteensopivuus esimerkiksi GSM-teknologiassa käytettyyn piirikytkentäiseen verkkoon (Circuit Switched Data, CSD).

EPS-arkkitehtuurilla on muutama selkeästi suorituskykyä parantavaa ominaisuutta, joista tärkeimpinä verkkoelementtien vähentäminen dataliikenteessä sekä toiminnan virtaviivaistaminen sisällyttämällä toimintoja tukiasemaan. Suorituskykyä parantaa myös verkon ohjauksen (Mobility Management Entity, MME) sekä käyttäjätason (Serving Gateway, S-GW) verkkoelementtien erottaminen. [6, s. 16–17.]

### 2.1.1 UE

Päätelaitteella (UE) tarkoitetaan laitetta, jolla loppukäyttäjä kykenee kommunikoimaan matkapuhelinverkossa. Yleisimpänä päätelaitteena käytetään älypuhelinia. Muita suosittuja päätelaitteita ovat esimerkiksi tabletit sekä kannettavat tietokoneet. Päätelaitteita myös kategorisoidaan niiden lähetys- sekä latausnopeuskyvykkyyksien mukaan. Universal Integrated Circuit Card (UICC) on erikseen päätelaitteeseen liitettävä älykortti, mikä paremmin tunnetaan SIM-korttina. UICC sisältää USIM-sovelluksen (Universal Subscriber Identity Module), jolla tunnistetaan ja todennetaan tilaaja sekä suojausavaimia käyttäen suojataan radiorajapinnan liikenne.

Tärkeä sekä loppukäyttäjälle näkyvä tehtävä päätelaitteella on luoda käyttöliittymä, jonka ansiosta voidaan käyttää erilaisia sovelluksia, esimerkiksi WhatsApp-, VoIP- sekä selainsovellusta. Pääasiallinen toiminto päätelaitteella on kuitenkin välittää signaali verkko-yhteyden muodostamiseen sekä ylläpitää kommunikaation linkkejä, joita käyttäjä tarvitsee. Lisäksi päätelaite lähettää verkolle tietoja sijainnista, jolloin voidaan tehdä optimaalisia solunvaihtoja ja hallitaan mobiliteetin toimintoja. [3, s. 26–27.]

### 2.1.2 Evolved Node B

E-UTRAN-radiorajapinnan ainoa verkkokomponentti on eNodeB-tukiasema, jonka kanssa loppukäyttäjät kommunikoivat LTE-kykenevällä päätelaitteella. Jokainen eNodeB pystyy palvelemaan useampaa päätelaitetta sen peittoalueella sekä kontrolloimaan yhtä tai useampaa solua. LTE-teknologiassa ei ole radioverkko-ohjaimia, joten eNodeB kommunikoi suoraan EPC-runkoverkkoon IP-pohjaisella yhteydellä. EPC-runkoverkon sekä eNodeB-tukiaseman välinen yhteys muodostetaan S1-rajapinnassa, kun puolestaan eNodeB-tukiasemat ovat keskenään yhteydessä X2-rajapinnalla. X2-rajapintaa käytetään pääosin signalointiin sekä solunvaihtoihin. [8.]

eNodeB jakaa resursseja radiorajapinnassa priorisoimalla ja aikatauluttamalla liikennettä Quality of Service (QoS) -priorisointitekniikkaa käyttäen sekä tarkkailee jatkuvasti resursien käytön tilannetta. Merkittävänä toiminteena eNodeB myös kontrolloi ja analysoi signaalinvoimakkuuden mittauksia sekä vastaanottaa päätelaitteelta tulevia mittauksia ja näiden perusteella tekee päätöksiä solunvaihdolle. Signaalinvoimakkuusmittausten perusteella voidaan tehdä solunvaihtoja myös toisiin eNodeB-tukiasemiin X2-rajapinnan avulla ja mahdollisesti vaihtamalla myös MME-verkkoelementtiä. Solunvaihdossa



eNodeB lähettää aikaisemmin palvelleelle tai uudelle MME:lle päätelaitteen lähettämän pyynnön verkkoon pääsystä riippuen, onko aikaisemmin palvelut MME sekä reittitiedot saatavilla. eNodeB voi olla kytkeytynyt moneen MME- sekä S-GW-verkkoelementtiin, kun puolestaan päätelaitetta palvelee vain yksi kumpaakin edellä mainituista verkkoelementeistä. [3, s. 27–28.]

### 2.1.3 Evolved Packet Core

EPS-arkkitehtuurin runkoverkko eli EPC julkaistiin 3GPP:n Release 8 -standardissa. Tärkeimpänä tavoitteena oli luoda madallettu arkkitehtuuri, jossa korostuu tehokas datan kuormitus sekä kustannustehokkuus. EPC-runkoverkko on suunniteltu erottamaan käyttäjädata sekä signaointi, jotta skaalaus on riippumatonta. Tästä toiminnosta johtuen operaattorit voivat mitoittaa sekä mukauttaa verkon helposti. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi EPC-runkoverkon komponentit.

#### *Home Subscriber Server (HSS)*

HSS on käyttäjäprofiileja hallitseva tietokanta, joka sisältää tilaajakohtaisia tietoja. Oleellisenä toiminteenä on tukea sijaintitietojen hallinnassa, puhelun sekä istuntojen luomisessa, käyttäjän tunnistuksessa sekä käyttäjän salausavaimien tallennuksessa. MME välittää käyttäjän rekisteröintitietoja HSS-tietokantaan käyttäen S6-rajapintaa, esimerkiksi välittäessä päätelaitteen sijaintitietoja. [9; 10, s. 40.] Jokaiselle päätelaitteelle HSS rekisteröi yhden MME-yhteyspisteen, ja kun uusi MME ilmoittaa palvelevansa kyseistä päätelaitetta, niin HSS poistaa vanhan MME:n sijainnin päätelaitteen tiedoista. HSS-tietokannalla on näin ollen tarve pystyä kommunikoimaan verkossa jokaisen MME:n kanssa, joihin päätelaitteella on mahdollisuus olla yhteydessä [3, s. 34].

#### *Mobility Management Entity (MME)*

EPC-verkon keskeisenä signaointiyhteyden (Control Plane, CP) elementtinä on MME, joka käsittelee mobiliteetin signaoinnin sekä verkkoon pääsyn turvatoimet E-UTRAN-rajapinnassa. MME on vastuussa valmiustilassa olevan päätelaitteen seurannasta ja mobiliteetista käyttäen NAS-signaointia (Non-Access Stratum) [9; 11]. Valmiustilassa olevan päätelaitteen hallinnoinnin avulla ennakoita tulevia istuntoja ja kytkeytymistä verkkoon. Mobiliteetin hallintaa käyttäen MME kontrolloi verkon resursseja päätelaitteen

aktiivisuuden perusteella sekä on osallisena signalointiin solujen vaihdoissa. eNodeB-tukiasemavaihtojen lisäksi MME on vastuussa siirroista toiseen S-GW-yhdyskäytävään tai MME:hen sekä yhteydestä 2G- ja 3G-verkon ohjaimiin. Päätelaitteen istuntoja varten MME on vastuussa signalointiin käytetyistä menetelmistä muodostaen pakettidatankontekstin ja siihen liittyvät parametrit, esimerkiksi QoS-priorisointitekniikkaan. [6, s. 22; 10, s. 40.]

Control Plane -signalointiyhteyden elementtinä MME myös huolehtii turvamenettelyistä, millä tarkoitetaan loppukäyttäjän tunnistamista sekä salausta. Turvamenettelyjen avulla pyritään suojaamaan kommunikointi salakuuntelulta sekä poissuljetaan kolmansien osapuolien mahdollisuus luvattomiin muutoksiin. HSS-tietokannan sekä MME:n välinen vuorovaikutus S6-rajapintaan käyttäen mahdollistaa tunnistustietojen tarkastamisen sekä päätelaitteen yksityisyyden suojelemisen. [3, s. 28–29.]

#### *Serving Gateway (S-GW)*

S-GW on tunnelointiyhteyden (User plane, UP) yhdyskäytävä. Tärkeimpänä tehtävänä sillä on saapuvien sekä lähtevien IP-pohjaisten pakettien kuljettaminen päätelaitteen ja ulkoisen mobiiliverkon välillä. IP-pakettien kuljetukseen kuuluu niiden välittäminen, reititys sekä valmiustilassa olevan päätelaitteen DL-datan puskurointi. S-GW-yhdyskäytävä on siis suoraan yhteydessä E-UTRAN-radorajapintaan. Lisäksi S-GW on yhteydessä MME-yhteyspisteeseen sekä P-GW-yhdyskäytävään (Packet Data Network Gateway), minkä edellytyksenä S-GW kykenee kontrolloimaan pakettidataliikennettä. S-GW on myös oleellisena pisteenä päätelaitteen liikkuesssa eNodeB-tukiasemien välillä E-UTRAN-rajapinnassa. S-GW on myös vastuussa käyttäjän datasta tämän siirtyessä LTE-verkon ja muiden 3GPP-teknologien, kuten 2G- sekä 3G-verkkojen välillä. [6 s. 22; 9.]

#### *Packet Data Network Gateway (P-GW)*

P-GW tai toiselta lyhenteeltään PDNGW toimii eräänlaisena yhteysankkurina, mikä työskentelee User Plane -tunnelointiyhteytenä EPS-arkkitehtuurin sekä ulkoisten IP-verkkojen (Packet Data Network, PDN), kuten Internetin ja IMS-järjestelmän liittymäpisteenä. PDN-verkosta tulevat ja lähtevät paketit reitittyvät P-GW-yhdyskäytävän voimin. P-GW-yhdyskäytävä jakaa päätelaitteelle EPS-arkkitehtuurin sisäisen IP-osoitteen sekä yhdistää ulkoisesta verkosta saadun IP-osoitteen käyttäen DHCP-palvelinta (Dynamic Host

Configuration Protocol) User Plane -tunnelointiyhteyden avauksen jälkeen. [6, s. 23.] IP-osoite jaetaan aina kun päätelaite kytkeytyy verkkoon ja myös myöhemmin, jos on tarvetta uudelle PDN-yhteydelle.

P-GW on Gx-rajapinnan kautta yhteydessä PCRF-verkkoelementtiin (Policy and Charging Rules Function), joka määrää toimintaperiaatteet verkon käytölle, luovuttaa laskutustiedot P-GW:lle sekä vastaa päätelaitteen datankantajien QoS-profiloinnista. S5/S8-rajapinnan kautta olevan yhteyden S-GW-yhdyskäytävään perustuessa GTP-tunnelointiprotokollaan (GPRS Tunnel Protocol), P-GW-yhdyskäytävä kartoittaa IP-datan GTP-tunneleihin, eli kantajiin (bearers). [3, s. 32.]

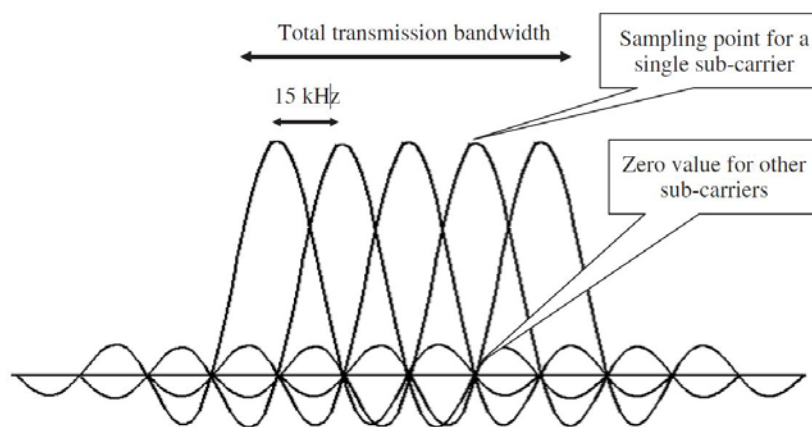
## 2.2 Fyysinen kerros

3GPP-standardisointijärjestö valitsi fysisen kerroksen (Physical Layer, PHY) downlink-tekniikaksi OFDMA:n (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ja puolestaan uplink-tekniikaksi SC-FDMA:n (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access). Tässä luvussa käydään edellä mainittujen digitaalisten modulointitekniikoiden toimintaperiaatteet läpi. MIMO-moniantennitekniikan (Multiple-Input Multiple-Output) kanssa kyetään maksimoimaan tiedonsiirtonopeuksia. Tämän mahdollistavat toiminnot myös kuvattuna tässä luvussa, kuten myös QAM-modulointitekniikka (Quadrature Amplitude Modulation).

### 2.2.1 OFDMA

OFDMA-taajuuskanavoinnin avulla voidaan toteuttaa korkeaa radiospektristä tehokkuutta. Sen lisäksi OFDMA-tekniikka kykenee tehokkaaseen aikataulutukseen aika- ja taajuustasossa. Tekniikka perustuu jakamalla käytettävissä oleva tiedonsiirtokanava useampaan kapeakaistaiseen alikantaaaltoon (sub-carrier), jotka voidaan jakaa useiden käyttäjien kesken. [5.] Käyttämällä tukiaseman lähettimessä OFDMA-tekniikkaa voidaan toteuttaa käyttäjien jako periaatteessa mihin tahansa taajuusalueen alikantaaaltoihin. Kuvassa 2 on kuvattu, kuinka tiedonsiirtokanavassa olevat alikantaaallot eroavat toisistaan niin, että joukosta valitun yksittäisen alikantaaallon näytteenottohetkellä (aallon huippu) on muissa naapurialikantaaalloissa nolla-arvo. Tämän operaation tekee nopea Fourier-muunnos (Fast Fourier Transform, FFT). Vaikka spektrit voivat olla päällekkäisiä taajuusalueella, niin ne eivät häiritse monitie-etenemistä, joka saavutetaan matemaatti-

sesti kohtisuorassa toisiinsa nähden olevilla alikantoaalloilla. Esimerkiksi FDM-taajuuskanavoinnissa häiritsemättömyys toteutetaan taajuuksien välillä olevalla turvakaistalla (guard band), jolla erotellaan alikantoaallot. OFDMA-tekniikassa tarvitaan näin ollen kaistaa vähemmän kuin FDM-tekniikassa. Symbolien keskinäishäiriön (Inter-Symbol Interference, ISI) välttämiseksi jokaisen siirretyn symbolijakson välissä on suoja-aika, joka tunnetaan paremmin nimellä Cyclic Prefix (CP). CP-tekniikka kopioi pienen osan symbolin alusta ja lisää sen symbolin loppuun. Tällöin vastaanotin pystyy havaitsemaan symbolin päätepisteen sekä erottelemaan symbolit keskenään. Alikantoaaltojen teho säilyy vakiona symbolien välillä sekä yksi alikantoaalto siirtää yhden datasymbolin. [12, s. 5-6.]



Kuva 2. Alikantoaaltojen ylläpitäminen OFDMA-tekniikassa [3, s. 69].

3GPP-standardointijärjestön Release 8 -määrittelyssä valittiin LTE-teknologiassa olevien alikantoaaltojen leveydeksi 15 kHz:n kaistanleveydestä riippumatta, jolloin symbolin pituus on LTE:n määrittelyissäkin annettu 66,7  $\mu$ s. Taajuustasossa rinnakkaiset alikantoaallot muodostuvat siten, että vastaavat aikatasossa useita siniaaltoja eri taajuuksilla täyttäen järjestelmän kaistanleveyden. OFDMA-järjestelmän perustuessa digitaalitekniikkaan ja erityisesti diskreettiin Fourier-muunnokseen (Discrete Fourier Transform, DFT) sekä sen käänteiseen toiminteeseen (Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT), johtaa se siihen, että voidaan liikkua aika- sekä taajuusalueiden välillä. Saatu signaali syötetään siniaallon nopeaan Fourier-muunnokseen (FFT), joka muuntaa signaalin aikatasosta taajuustasolle. FFT on algoritmi diskreettien Fourier-muunnosten (DFT/IDFT) laskemiseen ja vastakkaisen suunnan toiminteen tekee IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). [3, s. 67–76.]

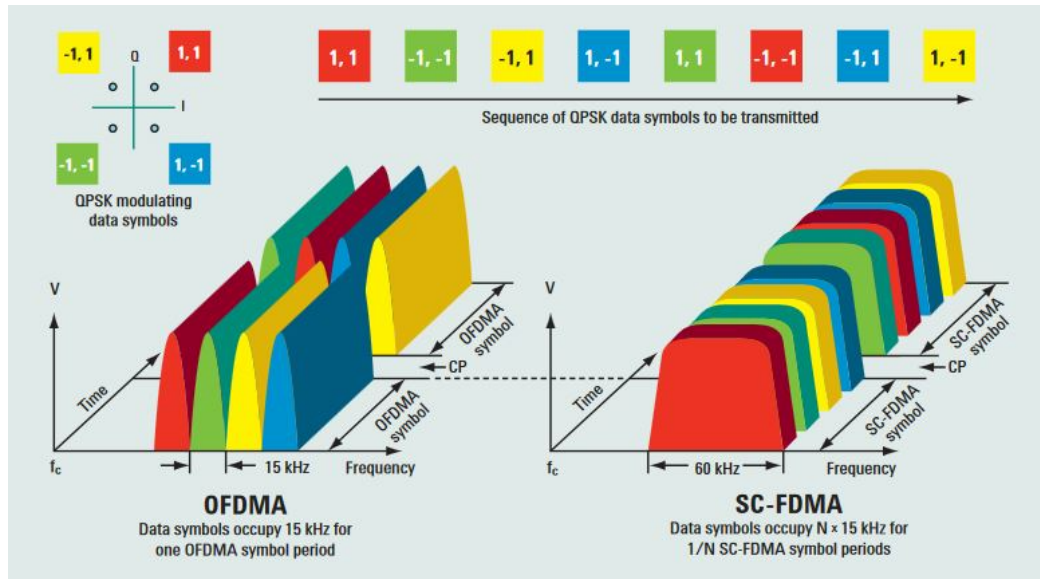
### 2.2.2 SC-FDMA

Uplink-suunnan monitie-etenemiseen 3GPP käyttää SC-FDMA-taajuuskanavointia, jossa symbolin pituus aikatasolla on myös 66,7  $\mu$ s, mutta symbolit on jaettu useampaan alisymboliin (sub-symbol). SC-FDMA:n signaali muistuttaa visuaalisesti enemmänkin yhden kantoaallon tekniikkaa, mikä myös selittää sen nimen Single-Carrier Frequency Division Multiple Access. Siinä kun OFDMA:ssa datasymbolit siirretään rinnakkain alikantoaloissa eli jaetaan taajuustasossa, SC-FDMA:ssa kaikki datasymbolit vievät isomman osan kaistanleveydestä ja ovat puolestaan jaettu aikatasossa edellä mainittuihin alisymboleihin vähentäen yksittäisen siirron aikaa. Siirrettäessä vain yhtä datasymbolia aikatasossa kerrallaan järjestelmä säilyttää hyvän parametrien optimoimisen, ja käytetty modulointimenetelmä kykenee hallitsemaan aaltomuodon ominaisuuksia. Näiden ansiosta SC-FDMA:lla voidaan saavuttaa todella pieni PAR-arvo (Peak-to-Average ratio), jolloin helpotetaan tehonkulutusta päätelaitteen vahvistimessa.

Häiritsemättömyyden toteuttamiseen ei myöskään tässä tekniikassa tarvita turvakaistoja käyttäjien välille. Kuten downlink-tekniikassa käytettävä CP-tekniikka on myös SC-FDMA:ssa käytössä häiriötä vähentääkseen. CP lisätään tässäkin tekniikassa määräajoin, mutta ei jokaisen symbolin jälkeen johtuen nopeammasta symbolinopeudesta aikatasolla verrattuna esimerkiksi OFDMA-tekniikkaan. Sen sijaan CP on lisättyä itse tiedonsiirtokanavaan estämään symbolien välistä häiriötä ja samalla yksinkertaistamaan vastaanottimen suunnittelua. Vastaanotin joutuu kuitenkin käsitellä alisymbolien välisten häiriöiden poistamisen kanssa, koska CP on lisätty erottelemaan symbolijaksoja eikä alisymboleita. Tämän takia vastaanottimen pitää ajaa taajuuskorjainta (equalizer), mikä puolestaan lisää vastaanottimen tehonkulutusta. Päätelaitteen lähetin lisää IFFT-muunnoksella tiedonsiirtokanavan haluamaansa osaan taajuutta, jonka tukiaseman vastaanotin kykenee tunnistamaan oikeista aika- sekä taajuuslähteistä. SC-FDMA vaatii siis eNodeB-tukiasemalta suurempaa prosessointitehoa kuin OFDMA:ssa, mutta vastaanottimen tehonkulutusta painavampana tekijänä uplink-tekniikkaa valittaessa oli akkukäyttöisten päätelaitteiden tehonkulutus. SC-FDMA-tekniikan avulla päätelaitteen lähettimen tehonkulutus on pienempää verrattuna vaikka OFDMA-tekniikkaan. Sekä sen lisäksi päästään parempiin uplink-kantomatkoihin. [3, s. 76–80.]

Kuvassa 3 on havainnollistettu OFDMA:n sekä SC-FDMA:n eroja aika- sekä taajuustasoilla. OFDMA:ssa QPSK-moduloinnilla (Quadrature Phase Shift Keying) kaistanleveys on jaettu neljään 15 kHz:n alikantoaaltoon, joiden pituus aikatasolla on 66,7  $\mu$ s, ja nämä

muodostavat yhden QPSK-symbolijakson. Vastaavasti SC-FDMA:ssa QPSK-modulointia käyttäen QPSK-symbolijakso koostuu  $4 \times 15\text{ kHz}$  eli  $60\text{ kHz}$ :n kaistanleveyisistä ali-symboleista, jotka jakautuvat neljään osaan  $66,7\text{ }\mu\text{s}$ :n pituisessa aikatasossa.



Kuva 3. OFDMA:n sekä SC-FDMA:n vertailu QPSK-datasymboleiden siirtämiseen symbolijaksoissa [12, s. 6].

### 2.2.3 MIMO

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) on moniantennitekniikka, jossa käytetään samanaikaisesti sekä tiedon lähetykseen että vastaanottoon kahta tai useampaa antennia. Ensimmäinen LTE-teknologian Release 8 -määrittely tukee kahden sekä neljän antennin MIMO-tekniikkaa ( $2 \times 2$  MIMO ja  $4 \times 4$  MIMO) downlink-tiedonsiirtoon, mutta uplink-suunnan MIMO-tekniikka julkaistiin vasta Release 10 -määrittelyssä. MIMO-tekniikalla on kaksi selkeää parannusta koskien langatonta tiedonsiirtoa: tuoda luotettavuutta tiedonsiirtoon sekä maksimoida tiedonsiirtonopeuksia. [13, s. 4-6.]

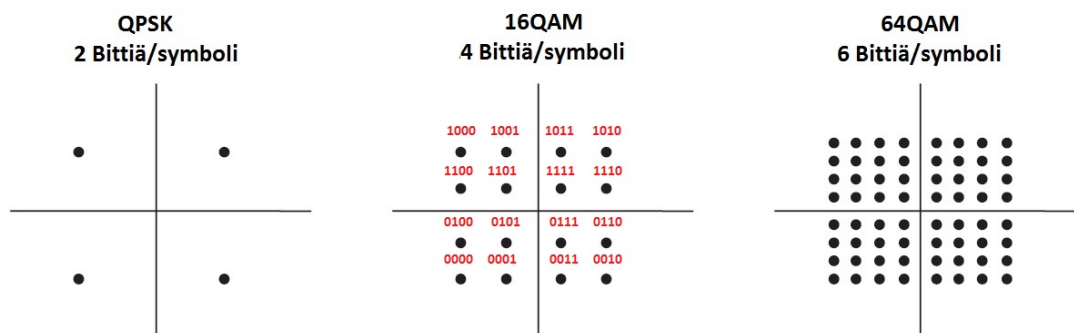
Tiedonsiirron maksimointi toteutetaan tilallisella limityksellä (spatial multiplexing), jonka peruseriaate on lähettää signaalit kahdesta tai useammasta antennista, joilla on erinäiset datavirrat. Vastaanottimessa erotellaan datavirrat ja näin voidaan saavuttaa teoriassa kaksinkertainen tiedonsiirtonopeus  $2 \times 2$  MIMO -tekniikalla sekä vastaavasti neljän antennin MIMO-tekniikalla ( $4 \times 4$  MIMO) nelinkertainen tiedonsiirtonopeus. Käytännössä maksimaalinen tiedonsiirtonopeus vaatii ympäristöltä erittäin hyvät olosuhteet monitie-

etenemiseen ja korkean signaali-kohinasuhteen (Signal-to-Noise Ratio, SNR), jolla tarkoitetaan hyötysignaalin sekä kohinasignaalin tehojen suhdetta. Antennien lukumäärän noustessa vaaditaan myös entistä parempaa SNR-arvoa, mikä saavutetaan useimmiten päätelaitteen ollessa lähellä eNodeB-tukiasemaa.

Antennidiversiteettitekniikan avulla luodaan luotettavuutta tiedonsiirtoon, koska vastaanotetusta signaalista kyetään tekemään useampia, erillisiä tulkintoja, joiden avulla saadaan vähennettyä häiriöitä. Monitie-etenemisen käsittelyyn tämä on erityisesti tehokasta, mikä johtuu radiosignaalien heijastumisesta ympäristössään, jolloin ne voivat häiritä toisiaan ennen kuin signaali lopulta vastaanotetaan. [3, s. 80–82; 6, s. 26–27.]

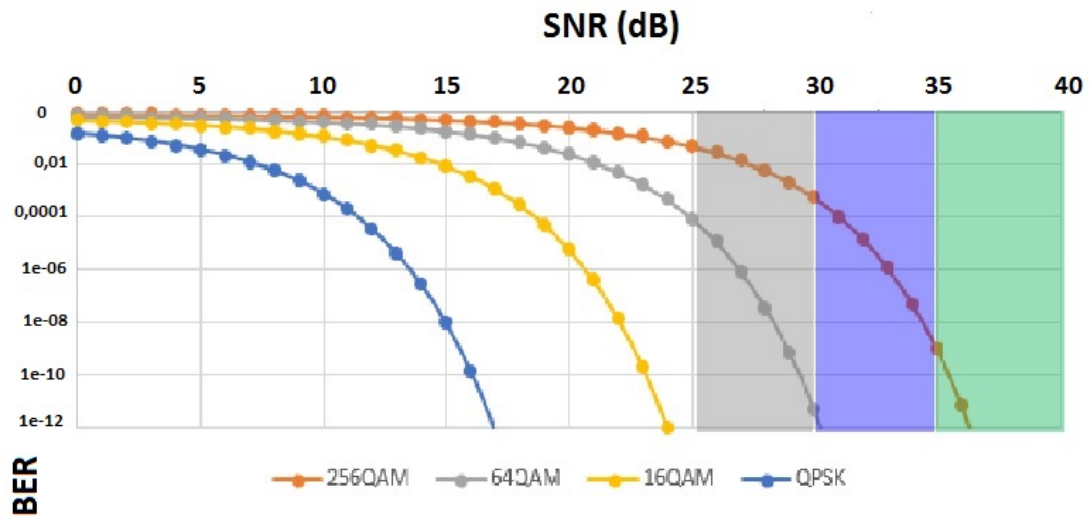
#### 2.2.4 Modulaatio

Käyttäjätiedon siirtämiseen käytetään joko QPSK- tai QAM-modulaatiota (Quadrature Amplitude Modulation). QAM-modulointitekniikalle on kapasiteetin mukaan koodauksia, joista LTE-tekniikassa on käytössä 64QAM, 16QAM sekä 4-QAM, joka on identtinen QPSK-modulaation kanssa. Moduloidussa signaalissa on  $2^b$  erilaista tilaa (modulaatio-symbolia), joka puolestaan saadaan bittien (b) määrästä per symboli, esimerkiksi 64QAM on 6-bittinen ( $2^6 = 64$ ). Modulaatiosymbolien lukumäärät ilmaistaan usein koordinaatistossa, jota sanotaan modulaation konstellaatioksi tai tähtikuvioksi. Kuvassa 4 on ilmaistu modulaatiomuotojen konstellaatioita, joista esimerkiksi 16QAM-modulaatio käyttää 16-pisteen konstellaatiota, missä on myös yhtä monta erilaista tilaa signaalille. Mitä korkeamman konstellaation modulaatiomuoto on kyseessä, sitä enemmän voidaan siirtää bittejä per symboli. Tämän ansiosta kyetään saavuttamaan suurempia datansiirtonopeuksia.



Kuva 4. LTE:ssä käytössä olevien QAM-modulaatioiden konstellaatiot.

Suurempien määrien modulaatiosymboleita kantavien modulaatioiden huonona puolena on se, että niiden yhteydet ovat alttiimpia kohinalle konstellatiopisteiden ollessa lähempänä toisiaan. Välttääkseen suurta bittivirheiden määrää suhteessa kaikkiin siirrettyihin bitteihin (Bit Error Rate, BER) korkeiden konstellatioiden modulaatiot kuten 64QAM vaatii tämän saavuttaakseen suuren SNR-arvon [14]. Käytettävä modulaatiotekniikka on siis hyvin riippuvainen radio-olosuhteista. BER- sekä SNR-arvon korrelaatiota modulaatioissa on ilmaistu kuvassa 5 olettaen, ettei käytössä ole kanavakoodausta tai minkäänlaista virheenkorjausta. Kuvasta voidaan tulkita, että esimerkiksi SNR-arvon ollessa 25dB, niin 64QAM-modulaatiossa muodostuu suuri bittivirhemäärä, kun puolestaan 16QAM-modulaatiossa bittivirheet jäävät lähes olemattomiin. Kuvassa on myös havainnollistettu 256QAM-modulaatio, mikä julkaistiin vasta downlink-suunnan tekniikaksi LTE-A:n (LTE Advanced) Release 12 -määrittelyssä. [15.]



Kuva 5. QAM-modulaatioiden suorituskykyjen vertailu käyttäen SNR- sekä BER-arvojen korrelaatiota [15].

### 2.3 Radioprotokolla-arkkitehtuuri

Tässä luvussa kuvataan E-UTRAN-radorajapinnan kokonaisuutta radioprotokollien rakenteen näkökulmasta. Radioprotokolla-arkkitehtuuri koostuu User Plane -tunnelointiyhteydestä sekä Control Plane -signaalintyyhteydestä, mitkä vastaavat käyttäjien tiedonsiirtoa sekä signaloinnista. Molemmat arkkitehtuurit koostuvat useiden protokollien pinnoista:



- RRC (Radio Resource Control), L3: Radioresurssien käyttöä hallitseva protokolla, joka on vastuussa päätelaitteen sekä eNodeB-tukiaseman välisestä signaloinnista, datayhteydestä sekä sisältää solunvaihtojen toiminnot [13, s. 17].
- NAS (Non-Access Stratum), L3: Protokollajoukko EPS-verkossa, mitä käytetään signaloinnissa päätelaitteen sekä MME-verkkoelementin välillä. NAS-protokollat auttavat päätelaitteen mobiliteetissa sekä istunnon hallinnassa ylläpitämällä IP-yhteyttä päätelaitteen sekä P-GW-verkkoelementin välillä. [11.]
- PDCP (Packet Data Convergence Protocol), L2: Vastaa käyttäjien pakettidataliikenteestä Control- sekä User Plane -yhteyksissä, muun muassa yhteyksien salauksesta sekä IP-pakettien kuljettamisen toiminnoista, jotta paketit tulevat oikeassa järjestyksessä. [16.]
- RLC (Radio Link Control), L2: Suorittaa PDCP:n tuottamien pakettien (Protocol Data Unit, PDU) segmentoinnin sekä ketjuttamisen radorajapinnan siirroissa. Fyysisen kerroksen uudelleenlähetystoiminteen epäonnistuessa tiedonsiirrossa RLC vastaa silloin uudelleenlähetysten käsittelystä ARQ-virheohjausmenetelmän (Automatic Repeat Request) kanssa. [3, s. 37; 13, s. 19.]
- MAC (Medium Access Control), L2: Tärkeimpänä tehtävänä on loogisten kanavien kartoittaminen siirtokanaviin sekä RLC:n PDU-pakettien kanavointi siirtolohkoihin (transport blocks, TB), jotka toimitetaan fyysiseen kerrokseen ja toiminnot myös vastakkaiseen suuntaan. Lisäksi se muun muassa suorittaa virheenkorjausta HARQ-virheenkorjausmenetelmän (Hybrid ARQ) kanssa. MAC-kerros myös toteuttaa resurssien jakoa päätelaitteen ja loogisten kanavien välillä aikatauluttamisen avulla. [3, s. 144; 16.]
- Fyysinen kerros (Physical Layer, PHY), L1: LTE-teknologian Layer 1 -taso, minkä toimintena on kantaa kaikki radiosignaalin bittitieto MAC-tiedonsiirtokanavilta LTE-Uu -ilmarajanpinnan päällä, josta vastaavat OFDMA- sekä SC-FDMA -taajuuskanavoinnit [16].

E-UTRAN-radorajapinta on yhteydessä EPC-runkoverkkoon S1-rajapinnan kautta, johon sisältyy seuraavia protokollia:

- S1AP (S1 Application Protocol): Hallitsee Control- sekä User Plane -yhteyksiä radorajapinnan (E-UTRAN) sekä runkoverkon (EPC) välillä [3, s. 37].
- IP (Internet Protocol): Reititystoiminto pakettidataverkolle, mikä tarkoittaa saapuvien datapakettien kokoamista ja käsittelyä sekä seuraavan verkkosolmun valitseminen lähteville datapaketeille.
- SCTP (Stream Control Transmission Protocol): Kuljetusprotokolla, joka muodostaa yhdessä IP-protokollan kanssa standardoidun IP-liikenteen signalointiviestien kuljettamiseen Control Plane -signalointiyhteydessä [3, s. 37].

EPC-runkoverkossa olevien P-GW- sekä S-GW -verkkoelementtien välissä käytetään S5/S8-rajapintaa. Periaate on sama sekä S5- ja S8-rajapinnoissa, ainoastaan erona on se, että S5-rajapintaa käytetään sisäisessä verkossa, kun puolestaan S8-rajapintaa käytetään LTE roaming -verkkovierailussa operaattorien välillä. Tässä rajapinnassa käytetään seuraavia protokollia GTP-tunnelointiprotokollan yhteydessä:

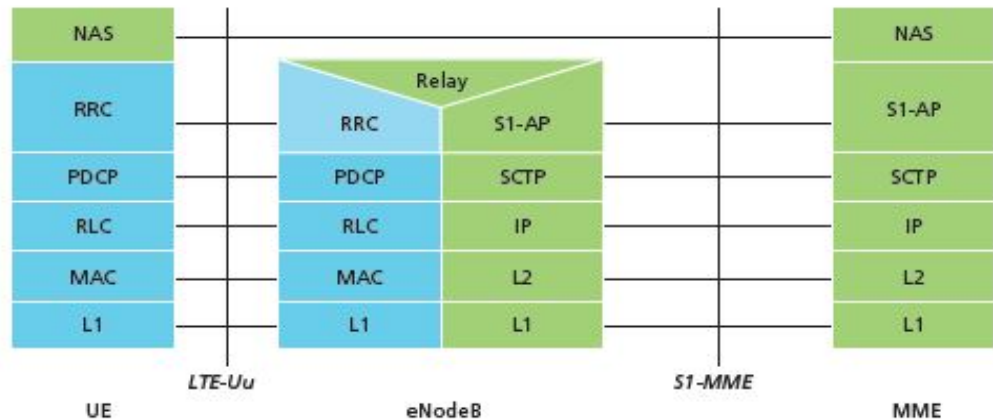
- GTP-C (GPRS Tunneling Protocol-Control Plane): Hallinnoi EPC-runkoverkon User Plane -tunnelointiyhteyttä, johon kuuluu myös QoS-priorisointitekniikan signaali sekä muita parametreja. Lisäksi se hallitsee GTP-U:n datatunneleita sekä EPC-runkoverkon mobiliteetin hallintaa, esimerkiksi päätelaitteen GTP-U-datatunnelien solmuvaihdossa.
- GTP-U (GPRS Tunneling Protocol-User Plane): Muodostaa GTP-tunnelin loppukäyttäjän IP-pakettien lähetystä varten EPS-arkkitehtuurissa.
- UDP/IP (User Datagram Protocol, Internet Protocol): UDP- sekä IP-protokolla muodostavat tavallisen, standardoidun IP-liikenteen. UDP-protokollaa käytetään TCP-protokollan (Transmission Control Protocol) sijaan sen takia, että se ei varmista pakettien perille menoa, koska sen hoitavat jo ylemmät tasot. Tästä syystä UDP-protokollalla on pienempi yleisrasite soveltuvin hyvin reaaliaikaisiin tiedonsiirtoihin. [3, s. 37–38.]

### 2.3.1 Control Plane

Control Plane -signaaliyhteys koostuu päätelaitteen sekä MME-verkkoelementin välisestä protokollapinosta. Tärkeimpänä protokollana lienee NAS-signaalin lisäksi RRC, jonka avulla kontrolloidaan E-UTRAN-signaaliyhteys päätelaitteen ja eNodeB:n välillä eli Radio Bearer -yhteyden (RB), mobiliteetin sekä verkon hakutoimintoja (paging) ja hallintaa [10, s. 188]. Control Plane käsittelee radorajapinnan toimintoja kahdella eri tavalla riippuen, onko päätelaite lepotilassa (RRC\_IDLE) vai aktiivisena (RRC\_CONNECTED). Päätelaitteen ollessa lepotilassa Control Plane -protokollat hankkivat järjestelmätietoja sekä solujen valinnan toimintoja, jolloin havaitaan muun muassa saapuvat puhelut. Puolestaan päätelaitteen ollessa aktiivisena Control Plane -signaaliyhteys käytetään RRC-protokollaa ja tämän avulla voidaan seurata yhteyden laatua sekä naapurisolujen tietoja, joiden avulla kyetään valita optimaalisin solu päätelaitteelle. [16.]

Kuvassa 6 on kuvattu Control Plane -protokollapino, jossa sinisellä värillä kuvatut protokollat kuuluvat AS-protokollaan (Access Stratum), jolla tarkoitetaan eNodeB-tukiaseman sekä päätelaitteen välisiä protokollia. Protokollapino loppuu MME-verkkoelementtiin MME:n päättäessä ylemmän tason protokollista.

Control Plane käyttää radiorajapinnassa (LTE-Uu) runkoverkon NAS- sekä RRC-signaaloinnin kuljetukseen protokollapinoa, johon kuuluvat PDCP-, RLC- ja MAC-protokollat sekä fyysinen kerros (PHY, L1). [17, s. 8.]

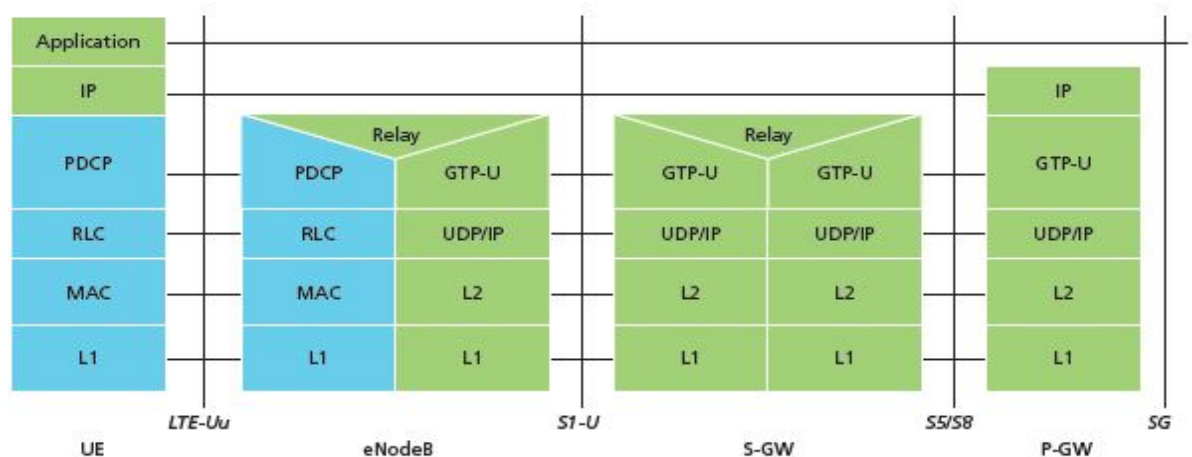


Kuva 6. Control Plane -signaalointiyhteyden protokollapinot verkkoelementtien mukaan [17, s. 8].

### 2.3.2 User Plane

User Plane -signaalointiyhteys vastaa käyttäjän datasta kuten myös sovelluspalveluiden signaloinnista, esimerkiksi SIP-tietoliikenneprotokollan (Session Initiation Protocol), jolla luodaan IP-puhelinyhteyksiä. EPC-runkoverkosta päätelaitteeseen tulevat IP-paketit tunneloidaan lähetystä varten P-GW-solmun sekä eNodeB-tukiaseman välillä. Eri tunnelointiprotokollia käytetään rajapintojen mukaan, esimerkiksi GTP-protokollaa käytetään S1-rajapinnassa eNodeB-tukiaseman ja S-GW:n välillä, ja tämän lisäksi myös S5/S8-rajapinnassa, joka on S-GW- sekä P-GW-verkkoelementtien välillä. Ulkoisista verkoista P-GW-solmuun saapuvien pakettien reitti voi muuttua istunnon aikana. Tämä voi tapahtua muun muassa S1-rajapinnassa eNodeB-tukiaseman vaihdossa tai erityisesti S-GW-solmun vaihdossa, jolloin pakettidatan tunnelia S5/S8-rajapinnassa on muutettava ylläpitääkseen jatkuvuutta palvelussa, kuten suoratoiston ja Web-selausistunnon välillä. Tunnelien luominen on osa dataistunnon perustamista, ja tällöin verkko muodostaa päätelaitteelle vaihtoehtoisia tunneleita erillisten EPS-kantajien ja PDP-kontekstien mukaan, joka sisällyttää tietoja tilaajan aktiivisesta istunnosta. GTP-tunnelointiprosessin näkyvyydellä päätelaitteen ja käytettävän sovelluspalvelimen välillä mahdollistaa reitti-päivitykset EPC- ja E-UTRAN-rajapintojen välisissä solmuissa. [10, s. 184–188; 17, s. 7-8.]

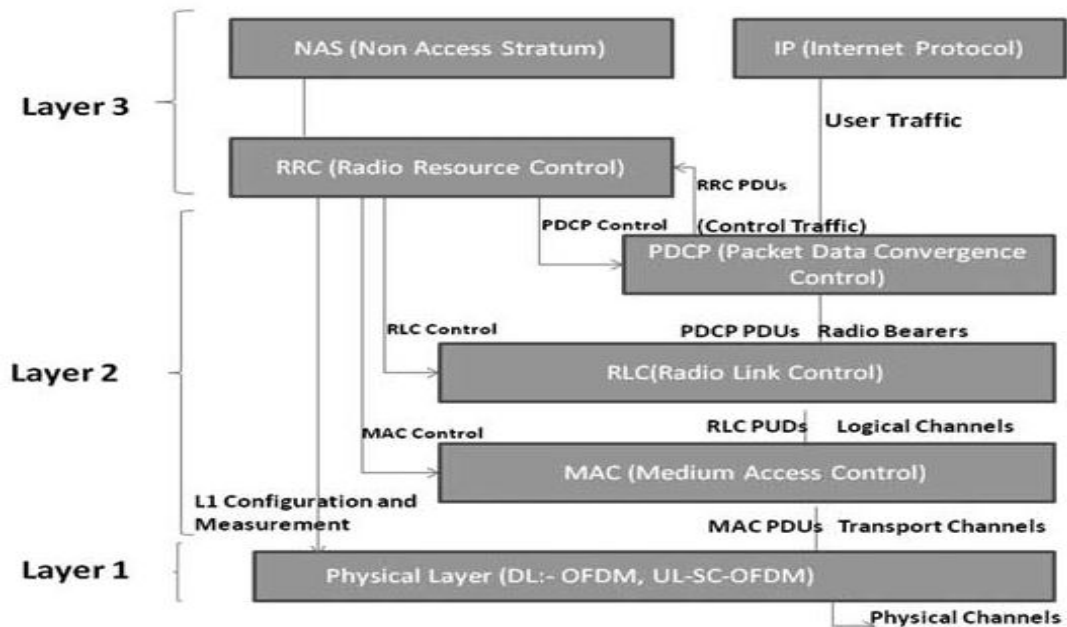
Kuvassa 7 on esitelty User Plane -tunnelointiyhteyden kuuluvat protokollapinot, joissa esiintyy sinisellä taustalla E-UTRAN-radorajapintaan kuuluvat AS-protokollat (PDCP, RLC, MAC), joiden verkkopuolen toiminteista vastaa eNodeB-tukiasema. RLC- MAC sekä PHY-tasot käyttävät samoja toiminteita sekä User Plane- että Control Plane -yhteyksille, mutta se ei tarkoita, että tieto kulkeutuisi samalla tavalla. Päätelaitteen sekä verkon välille voidaan muodostaa monta RB-yhteyttä, ja jokaisessa niissä on yksilöity prioriteettikäsittely, suojaus sekä tiedonsiirtorakenne. [10, s. 184–188; 17, s.7-8.] Näiden erilaisten radiokantajien yksilöimisellä esiin astuvat radiokanavat, joista kerrotaan tarkemmin seuraavassa luvussa.



Kuva 7. User Plane -tunnelointiyhteyden protokollapinot verkkoelementtien mukaan [17, s. 7].

## 2.4 Kanavarakenne

Saavuttaakseen tehokkaasti suuria datanopeuksia sekä pieniä viiveitä tiedonsiirrossa E-UTRAN-radorajapinnassa käytetään monenlaisia kanavia erityyppisille datoilte. Signaalointiviestien kuljettamisessa on erittäin tärkeää, että tieto siirtyy nopeasti sekä virheettömästi, kun puolestaan kohtuullista kehushäviötä radiotiedonsiirrossa voidaan sallita äänen sekä datasuoratoiston sovelluksissa. Lisäksi interaktiivisissa sovelluksissa kuten verkkoselaimen käytössä voidaan radioetenemisteiden ongelmia korjata ilman suurempia käyttövaikutuksia uudelleenlähetyksen avulla. Joustavuutta sekä erilaisuutta tiedonsiirroissa mahdollistavat E-UTRAN-radorajapinnan erityyppiset kanavat: loogiset kanavat (logical channels), siirtokanavat (transport channels) sekä fyysiset kanavat (physical channels). [10, s. 190; 18.] Kuvasta 8 on nähtävissä, kuinka kanavat sijoittuvat E-UTRAN-radorajapinnan protokollapinon kerroksiin.



Kuva 8. E-UTRAN-radorajapinnan protokollapinit sekä kanavat [16].

#### 2.4.1 Fyysiset kanavat

Data sekä signaalointiviestit kuljetetaan eri tasoilla fyysisessä kerroksessa, jossa OFDM-taajuuskanavoinnin ominaisuudet muodostavat tämän E-UTRAN-radorajapinnan rakenteen. Fyysiset kanavat jakautuvat uplink- sekä downlink-suunnan kanaviin, missä kanaville on erilaiset vaatimukset sekä toiminnot. Downlink-suunnan kanavat tarkemmin:

- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel): Kuljettaa ylemmän kerroksen signaloinnin sekä käyttäjädataa.
- PDCCH (Physical Downlink Control Channel): Kuljetetaan aikataulutusta sekä toimeksiantoja uplink-siirrolle.
- PMCH (Physical Multicast Channel): Kuljettaa ryhmä- sekä yleislähetysten (Multicast/Broadcast) tietoja. Ryhmälähetystyksiä käytetään esimerkiksi videoneuvotteluissa ja yleislähetystä, kun halutaan tietoa samassa aliverkossa olevista laitteista.
- PBCH (Physical Broadcast Channel): Kuljettaa järjestelmätiedot.
- PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel): Tiedottaa päätelaitteelle PDCCH-kanavassa käytettyjen OFDM-symbolien määrän.
- PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel): Kuljettaa HARQ-virheenkorjausmenetelmän tiloja (ACK/NACK) uplink-suunnan lähetykselle. [10, s. 190; 18.]

Fyysisiin kanaviin kuuluu downlink-kanavien lisäksi kolme uplink-kanavaa:

- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel): Kuljettajaa käyttäjädataa sekä ylempien tasojen signalointia. Vastine downlink-suunnan PDSCH-kanavalle.
- PUCCH (Physical Uplink Control Channel): Kanavan avulla kuljetetaan uplink-suunnan hallintatietoja, joka sisältää HARQ-tilat päätelaitteelta downlink-siirrolle.
- PRACH (Physical Random Access Channel): Käytetään satunnaisiin toimintoihin ja on näin ollen ainoa ei-synkronoitu lähetys, mitä päätelaite voi tehdä LTE-verkossa. [18.]

#### 2.4.2 Siirtokanavat

Siirtokanavat määrittelevät, kuinka ja miten data siirretään radiorajapinnan ylitse. Näitä kanavia käytetään myös kun fyysinen kerros (L1) suorittaa tietojen vaihtoa MAC-kerroksen kanssa, tämän lisäksi siirtokanavia käytetään ylempien kerrosten (L2/L3) tietojen kuljettamiseen. Downlink- ja uplink-lähetyksille on erilaiset vaatimukset sekä toimintatavat, minkä vuoksi molemmille erilaiset siirtokanavat. [18.] E-UTRAN-radiorajapintaan kuuluu neljä downlink-siirtokanavaa:

- Broadcast Channel (BCH): Mahdollistaa päätelaitteen liittymisen järjestelmään välittämällä välttämättömiä järjestelmäparametreja, joita ovat esimerkiksi lähetysantennien lukumäärä, solun kaistanleveys ja PHICH-kanavaan liittyvät määritykset.
- PCH (Paging Channel): Kuljettaa verkon mainostuksen (paging) tietoja päätelaitteelle, jotta päätelaitteen voi siirtää lepotilasta (RRC\_IDLE) aktiivitilaan (RRC\_CONNECTED) [3, s. 84].
- DL-SCH (Downlink Shared Channel): Tärkein kanava downlink-datan siirtämiseen sekä käyttäjän hallintaan [10, s. 191].
- MCH (Multicast Channel): Siirtää ryhmälähetyspalveluiden sisältöä päätelaitteelle.

Uplink-suunnankin siirtokanavia esiintyy E-UTRAN-radiorajapinnassa:

- UL-SCH (Uplink Shared Channel): Uplink-suunnan vastine DL-SCH-kanavalle käyttäjän hallintaa ja uplink-datan siirtämistä varten.
- RACH (Random Access Channel): Käytetään mainostusviestien (paging) välittämiseen, RRC\_IDLE-tilan vaihtamiseen RRC\_CONNECTED-tilaan, kun tarvitaan datansiirtoa sekä UL-SCH-lähetysten toteutukseen. [3, s. 84]

### 2.4.3 Loogiset kanavat

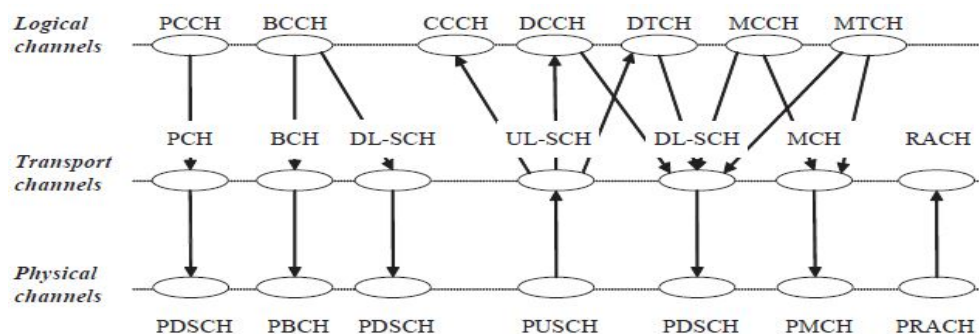
Loogisten kanavien avulla siirretään radiorajapinnan protokollien tarjoamat datansiirto-palvelut ylemmille tasoille, millä käytännössä tarkoitetaan palveluita MAC-kerroksesta RLC-kerrokselle. Loogiset kanavat jaetaan myös kahden tyyppisiin kanaviin, ohjauska-naviin (control channels) sekä liikennekanaviin (traffic channels). [10, s. 190.] Control Plane -signaalintyhteyden tietojen siirtoon käytettävät ohjauskanavat:

- BCCH (Broadcast Control Channel): Tarjoaa järjestelmätiedot kaikille eNodeB-tukiasemaan kytketyille päätelaitteille.
- PCCH (Paging Control Channel): Käytetään hakutietojen (paging) kuljetta-miseen päätelaitteelle.
- CCCH (Common Control Channel): E-UTRAN-radiorajapinnan sekä pää-telaitteen väliselle kommunikoinnille, kun saatavilla ei ole RRC-yhteyttä.
- MCCH (Multicast Control Channel): Kuljettaa ryhmälähetysten tietojen ver-kosta yhdelle tai useammalle päätelaitteelle.
- DCCH (Dedicated Control Channel): RRC- sekä NAS-signaloinnin hallin-taan verkon ja päätelaitteen välillä. [10, s. 190–191; 18.]

User Plane -tunnelointiyhteyden tietojen kuljettamiseen tarvitaan liikennekanavia:

- DTCH (Dedicated Traffic Channel): Käyttäjän datan kuljettamiseen sekä sovellustasossa olevan tietovirran signaointi.
- MTCH (Multicast Traffic Channel): Käytetään ryhmälähetysten datan lähe-tykseen. [10, s. 191.]

Kuvassa 9 on havainnollistettu E-UTRAN-radiorajapinnan erityyppiset kanavat sekä nii-den tietovirran suunnat (downlink/uplink) nuolilla kuvattuna.



Kuva 9. Kanavatyyppien kartoitus E-UTRAN-radiorajapinnassa [10, s. 193].

### 3 LTE-Advanced

3GPP:n vuonna 2011 kehittämälle Release 10 -määrittelylle tärkeintä tavoite oli luoda LTE-teknologia, joka täyttää ITU-R-standardointijärjestön (International Telecommunication Union Sector) määrittelemät vaatimukset neljännen sukupolven matkapuhelinteknologi-alle. Nämä vaatimukset tunnetaan nimellä IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications Advanced). Vaatimuksien täytyessä ITU-R nimitti Release 10 -määrittelyn LTE-Advancediksi (LTE-A) tämän täyttäessä IMT-Advanced-vaatimukset. [3. s. 487–488.]

LTE-A tuo uusia ominaisuuksia LTE-teknologialle säilyttämällä yhteensopivuuden LTE:n Release 8- sekä Release 9 -määrittelyiden kanssa. Tärkeimpänä tehtävänä 3GPP:llä oli luoda uuden ilmarajapinnan sijaan suurempaa kapasiteettia LTE-verkolle laajentamalla ominaisuuksia, joiden ansiosta saadaan selvästi suurempia datansiirtonopeuksia kustannustehokkaasti IMT-Advanced -teknologiavaatimusten puitteissa. [4.] LTE-A-teknologian ominaisuudet mahdollistavat selvästi parempaa suorituskykyä edeltäviin määrittelyihin verrattuna:

- huippunopeus downlink-suuntaan 4 Gbit/s
- huippunopeus uplink-suuntaan 1,5 Gbit/s
- downlink-spektritehokkuus 30 bit/s/Hz
- uplink-spektritehokkuus 15 bit/s/Hz
- parempi suorituskyky solujen reunoilla
- aktiivisen laitteen viiveaika 5 ms
- lepotilassa olevan laitteen viiveaika 50 ms [19]

Huippunopeudet ovat teoreettisia vaatien esimerkiksi downlink-suunnan maksiminopeuteen loistavien radio-olosuhteiden lisäksi myös 8x8 MIMO -antennitekniikkaa, 100 MHz spektriä, joka sisältää viisi 20 MHz:n ja 256QAM-modulaation omaavaa kantoaaltoa. Näiden ominaisuuksien tukemiseen tarvitaan IMT-Advanced-määrittelyt merkittävästi ylittävä sekä kaikkiin päätelaitteen fyysisen kerroksen ominaisuuksiin yltävä, kategorian 8 -pätelaitte (LTE UE Category 8), joita ei ole markkinoilla saatavilla. [20.]



Käytännössä kuitenkin datanopeudet jäävät teoreettisista nopeuksista kauas muun muassa markkinoilla olevien päätelaitteiden, operaattorilla olevan kaistanleveyden sekä modulaatioiden vuoksi. Käytännön esimerkkinä lienee Suomessa tehty tutkimustulos, joka perustuu riippumattoman Ooklan Speedtest -sovelluksen mittauksiin. Ookla on maailman johtava laajakaistatestauksen sekä web-pohjaisten diagnostisten sovelluksien kehittäjä. Tutkimuksen mukaan Teliällä on Suomen nopein mobiiliverkko, jonka keskimääräinen downlink-suunnan latausnopeus on 29,58 Mbit/s. Tutkimustulokset on saatu käyttäjien suorittamien Speedtest-mittauksien perusteella ajalta 1.4.–30.9.2016, jolloin kaikkien Suomessa olevien operaattoreiden verkoissa tehtiin 1,2 miljoonaa mittausta, joista Telian verkossa suoritettiin 371 869 kappaletta. Yksittäisten, suurempien kaupunkien korkein keskimääräinen latausnopeus oli 37,65 Mbit/s, mikä mitattiin Espoossa. Merkille pantavaa on se, että mittauksissa on mukana kaikkien sukupolvien matkapuhelinteknologiat. [21.]

Seuraavissa kappaleissa syvennyttään LTE-A-tekniikan myötä tullessiin uusiin päätelaitteiden kategorialuokitukseen sekä ominaisuuksiin, joiden avulla voidaan saavuttaa radioverkon puolelta edellä listattuja suorituskyvyn määreitä. Huomioitavaa on, että kantoaaltojen yhdistäminen on kuvattu myöhemmin luvussa 4 työn aiheen painottuessa Carrier Aggregation -ominaisuuteen.

### 3.1 UE-kategorialuokitukset

Päätelaitteiden kategorialuokitus on parametri, jonka avulla voidaan luokitella päätelaitteet niiden fyysisen kerroksen ominaisuuksien perusteella. Kategorioiden avulla eNodeB-tukiasemat pystyvät kommunikoimaan tehokkaasti kaikkien siihen yhteydessä olevien päätelaitteiden kanssa määrittämällä yhteydet UE:n suorituskyvyn tason perusteella. UE-kategoria on vain osoitus käyttäjän päätelaitteen ominaisuuksista ja ylärajoista saavutettavien datanopeuksien suhteen. Tarkemmat tiedot päätelaitteen kyvykkyyksistä signaloidaan verkkoon RRC-kerroksessa. [20.] Taulukossa 1 on kuvattu LTE:n ja LTE-A:n Release 8-13 -määrittelyjen myötä räätälöidyt UE-kategorialuokat sekä niiden suorituskykyominaisuudet. Päätelaitteiden kategorioiden ominaisuuksiin kuuluu lataus- sekä lähetyksenopeus, kantoaaltoihin ja niiden yhdistämiseen käytetty RF-kaistanleveys (Radio Frequency Bandwidth), lataukseen sekä lähetykseen käytetty modulaatio ja MIMO-moni-antennitekniikka.

Taulukko 1. LTE Release 8-12 -määrittelyjen UE-kategorialuokitukset [13, s. 26–27, 42].

UE-kategoria	DL-Huip-puopeus (Mbit/s)	UL-Huip-puopeus (Mbit/s)	RF-kais-tanle-veys (MHz)	DL-mo-dulaatio	UL-mo-dulaatio	DL MIMO	UL MIMO
1	10	5	20	64QAM	16QAM	2x2	Ei
2	50	25	20	64QAM	16QAM	2x2	Ei
3	100	50	20	64QAM	16QAM	2x2	Ei
4	150	50	20	64QAM	16QAM	2x2	Ei
5	300	75	20	64QAM	64QAM	4x4	Ei
6	300	50	40	64QAM	16QAM	2x2, 4x4	Ei
7	300	100	40	64QAM	16QAM	2x2, 4x4	2x2
8	3000	1500	100	64QAM	64QAM	8x8	4x4
9	450	50	60	64QAM	16QAM	2x2, 4x4	Ei
10	450	100	60	64QAM	64QAM	2x2, 4x4	2x2
11	600	50	80	64QAM	16QAM	2x2, 4x4	Ei
12	600	100	80	64QAM	16QAM	2x2, 4x4	2x2
13	390	50	40	256QAM	16QAM	2x2, 4x4	Ei
14	390	100	40	256QAM	16QAM	2x2, 4x4	2x2
15	3900	1500	100	256QAM	64QAM	8x8	4x4
16	1000	150	80	256QAM	64QAM	2x2, 4x4	2x2

LTE-verkon ensimmäisten Release 8- sekä Release 9 -määrittelyjen myötä tulivat ensimmäiset 1-5 -kategorialuokkaa, joista UE Category 5 -luokan päätelaite kykenee teoriassa 300 Mbit/s latausnopeuteen käyttämällä 4x4 MIMO-tekniikkaa. LTE-Advanced -teknologian ensimmäisen määrittelyn myötä julkaistiin kolme uutta UE-kategoriaa: 6, 7 sekä 8. Nämä kategorialuokitukset ovat ensimmäisiä, jotka tukevat kantoaaltojen yhdistämistä (Carrier Aggregation), esimerkiksi vuonna 2014 markkinoille tulleiden UE Category 6 -luokituksen päätelaitteiden ominaisuuksiin kuuluu kahden 10 MHz:n kantoaaltojen yhdistämistä. Maaliskuussa 2015 valmistunut Release 12 -määrittely toi vielä viisi uutta UE-kategoriaa, joissa korostuu kantoaaltojen yhdistäminen. Lisäksi osassa UE-luokista löytyy tuki downlink-suunnan 256QAM-modulaatiolle, jonka avulla voidaan teoriassa saavuttaa jo pelkästään yhdellä 20 MHz:n kantoaallolla ja 2x2 MIMO -tekniikalla jopa 200 Mbit/s latausnopeuksia.

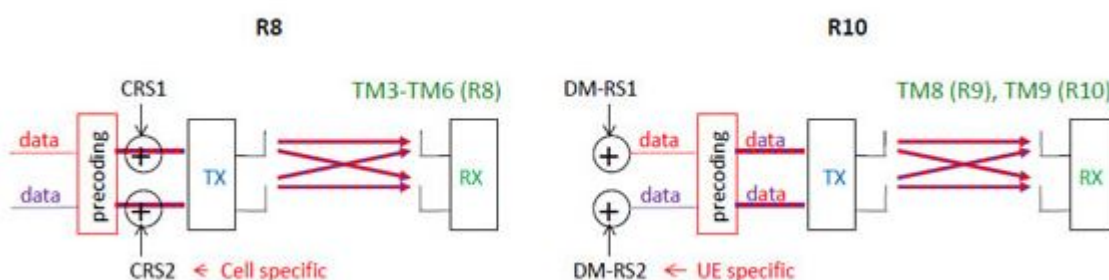
Kesäkuussa 2017 markkinoiden kehittyneimmät päätelaitteet ovat UE Category 16 -luokan omaavia laitteita, jotka kykenevät 1000 Mbit/s latausnopeuteen, neljän kantaallon yhdistämiseen sekä 256QAM-modulaation DL-tiedonsiirrossa. [13, s. 26–27; 20.]

### 3.2 Paranneltu MIMO-tekniikka

Yksi keskeisistä toimintaedellytyksistä LTE-A:lle on jo aiemmasta LTE:n Release 8 -määrittelystä tuttu, muun muassa luotettavuutta tiedonsiirtoon sekä suurempia datanopeuksia saavuttava MIMO-moniantennitekniikka. Aiemmin LTE tuki vain maksimissaan 4x4 MIMO -antennitekniikkaa downlink-tiedonsiirrossa ja puolestaan uplink-tiedonsiirrossa vain yhden antennin käyttöä. LTE-A:n Release 10 -määrittelyn myötä käytettävien antennien määrä MIMO-tekniikassa nousi jopa 8x8 MIMO -tekniikkaan downlink-tiedonsiirron suhteen sekä 4x4 MIMO -tekniikkaan uplink-tiedonsiirrossa. MIMO-moniantennitekniikkaa voidaan käyttää kun radiokanava on korkealaatuista; toisin sanoen signaali-kohinasuhde (SNR) on korkea. [4.] 8x8 MIMO -antennitekniikalla ja tilallisella limityksellä siirrettävä data jakautuu kahdeksan lähetyssantennin kesken, jolloin voidaan saavuttaa 20 MHz:n kaistanleveydellä ja 256QAM-modulaatiolla jopa 780 Mbit/s tiedonsiirtonopeus spektritehokkuuden noustessa 30 bit/s/Hz.

LTE-A-verkossa on muutamia tiloja MIMO-tekniikan käytölle: SU-MIMO (Single-User MIMO), MU-MIMO (Multi-User MIMO) sekä CO-MIMO (Cooperative MIMO). Lisäksi uusi 8x8 MIMO-tekniikkaa tukeva esikoodauksen siirtotila TM9 (Transmission Mode 9) kehitettiin, joka tukee sekä SU-MIMO- että MU-MIMO-tilaa ja mahdollistaa dynaamisen vaihdon näiden tilojen välille. MU-MIMO-tilalla tarkoitetaan moniantennitekniikan tiedonsiirtoa, jossa rinnakkaiset datavirrat kuljetetaan tilallisesti eroteltuina eri päätelaitteille kun vastaavasti SU-MIMO-tilassa rinnakkaiset datavirrat lähetetään yksittäiselle päätelaitteelle. CO-MIMO-tilassa puolestaan useampi eri eNodeB-tukiaseman solu palvelee yhtä käyttäjää. [3, s. 496.] Usean antennin lähetystä varten vaaditaan Transmission Mode (TM), joka tiedotetaan päätelaitteelle RRC-signaaloinnin avulla, tällöin päätelaite tietää mitä TM-siirtotilaa se käyttää. Downlink-lähetyksille on Release 10 -määrittelyn TM9:n julkaisun jälkeen olemassa yhdeksän siirtotilaa ja puolestaan uplink-lähetyksille TM1 ja TM2, joista jälkimmäisellä voidaan käyttää 4x4 MIMO UL -tekniikkaa. Siirtotiloilla on monta ominaisuutta, mitkä erottavat ne toisistaan: sallitut datavirrat, antenniporttien lukumäärä, esikoodauksen tyyppi sekä referenssisignaalin tyyppi. [4.]

Erilaiset referenssisignaalit erottavat samaa taajuus- ja aikalähteitä käyttävät datavirrat toisistaan. Kasvavan antennimäärän tehokastakäyttöä varten downlink-lähetyksille otettiin käyttöön uusi referenssisignaali CSI-RS (Channel State Information Reference Signals), muun muassa 8x8 MIMO -tekniikkaa varten. CSI-RS-referenssisignaalia käytetään kun päätelaite arvioi ja raportoi tiedonsiirtokanavan laadun eli CQI-indikaattorin (Channel Quality Indicator) indeksiarvon eNodeB-tukiasemalle, mikä tekee valinnat käytettävälle modulaatiolle ja koodausmenetelmille perustuen CSI-palautteeseen. LTE-tekniologiassa on CQI-indikaattorille kannettavaksi viisitoista eri indeksia tiedonsiirtokanavan laadun arvioimiseen, joista 1-indeksi tarkoittaa huonoa laatua ja käytännössä QPSK-modulaation käyttöä ja vastaavasti 15-indeksi parhaimman modulaation käyttöä ja näin ollen erinomaista tehokkuutta kanavankäytölle. Signaali-kohinasuhde eli SNR-arvo on suuressa roolissa CQI-mittauksissa. [3, s. 498–499; 13, s. 23.]



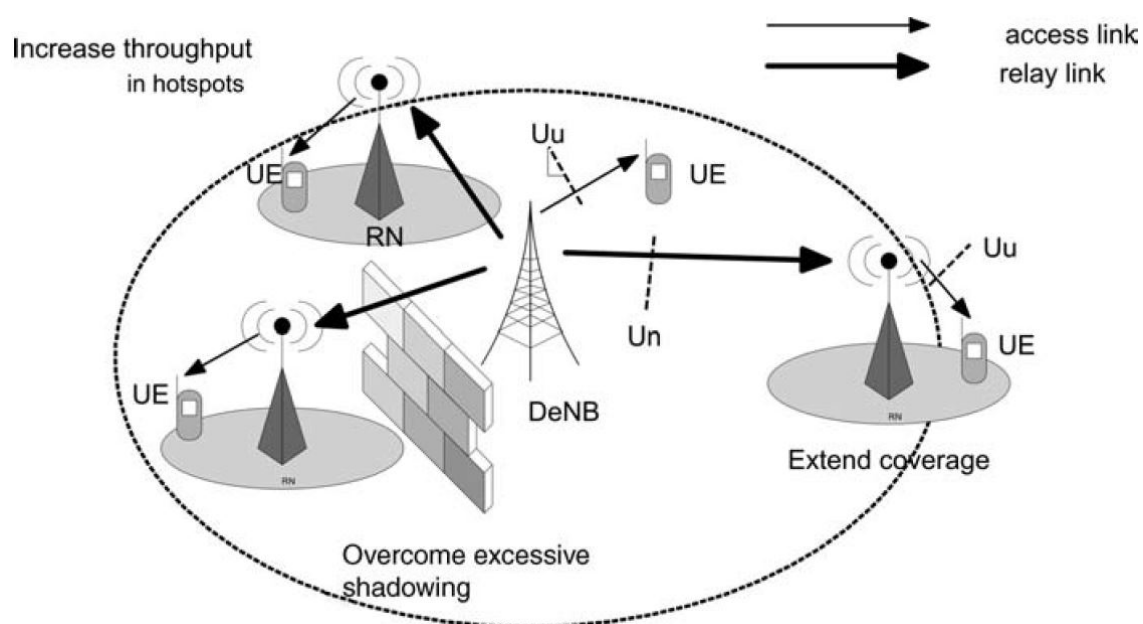
Kuva 10. Release 8- ja Release 10 -määrittelyjen MIMO DL-tiedonsiirroissa käytetyt referenssisignaalit sekä TM-tilat [4].

Downlink-lähetyksiä varten kehitettiin myös DM-RS (Demodulation Reference Signals) tai toiselta nimeltään URS (User-Specific Reference Signals) eli päätelaitekohtainen referenssisignaali, joka lisätään ennen esikoodausta ja on ominainen jokaiselle datavirralle eri lähetyksentenneissa. Tämän avulla eNodeB-tukiasema voi käyttää mitä tahansa esikoodausta downlink-tiedonsiirroissa. Esikoodauksen avulla saadaan mahdollisimman hyvä datan vastaanottaminen vastaanottimessa. [4.] Kuvassa 10 on havainnollistettu referenssisignaalin käyttöä aiemman LTE Release 8 -määrittelyn sekä LTE-A:n Release 10 -määrittelyn kesken. Release 8 -määrittelyssä käytetty referenssisignaali CRS (Cell-specific Reference Signal) on solukohtainen ja lisätään esikoodauksen jälkeen; yksi CRS-antennia kohden.

Uplink-tiedonsiirrossa DM-RS-referenssisignaalit lähetetään yhdessä fyysisen kanavan, PUCCH:n kanssa. Uplink-tiedonsiirrossa käyttäessä MU-MIMO-tilaa päätelaitteet voidaan kohdentaa käyttämään samoja uplink-taajuusresursseja OCC-koodauksen (Orthogonal Cover Codes) avulla. MU-MIMO-tilan käytössä päätelaitteille osoitetaan eri OCC-koodit ja tällöin voidaan joustavasti aikatauluttaa taajuusresursseja käyttäjien kesken. [3, s. 499–505.]

### 3.3 Relay Node -tukiasemat

LTE-Advanced-tekniikan tuomat nopeat datansiirtonopeudet vaativat pieniä välimatkoja tukiasemien välillä, jotta voidaan tarjota parempia yhteyksiä myös usein huononsignaali-kohinasuhteen (SNR) omaaville käyttäjille solujen reuna-alueilla. Release 10 -määrittelyssä luotiin tuki pienitehoisille Relay Node -tukiasemille (RN), joiden avulla saadaan kapasiteettia ja peittoaluetta näihin solujen reuna-alueille sekä tehdään mahdolliseksi tehokas suunnittelu heterogeenisille verkoille eli pienten ja suurten solujen yhdistämiselle. Relay Node -tukiasemien sijoittamisella kyetään lisäksi tehostamaan kapasiteettia paljon käyttäjiä sisältäville, tarkoille sijainneille lyhentämällä lähettimen ja vastaanottimen välistä etäisyyttä sekä esimerkiksi syrjäisille paikoille ilman tarvetta kuituyhteydelle. [4.] Kuvassa 11 on havainnollistettu näitä vaihtoehtoisia käyttötarkoituksia RN-tukiasemille.



Kuva 11. Donor eNB -tukiaseman peittoalue sekä vaihtoehtoisia käyttötarkoituksia Relay Node -tukiasemille radiorajapintoineen [6, s. 27].

LTE-teknologiassa on käytetty jo Release 8 -määrittelystä lähtien toistimia (repeater), jotka yksinkertaisesti vahvistavat signaalia ja lähettää sen eteenpäin (Amplify and Forward, AF). Operaattorit ovat käyttäneet tätä ratkaisua erityisesti rakennuksien sisäkuuluvuuden parantamiseen varsinkin 2G- ja 3G-taajuuksille, jotta usein tärkein palvelu eli puhelut saadaan toimimaan, jos ei ole käytössä 4G-puheluihin kykenevää VoLTE-tekniikkaa (Voice Over LTE). Toistimien selkeänä haittapuolena on se, että ne myös vahvistavat häiriöt sekä kohinat halutun signaalin lisäksi, jolloin toistimen toiminta ei ole tehokasta näiden häittatekijöiden kanssa. LTE-A:n julkaisun myötä tulleet RN-tukiasemat korjaavat nämä toistimen puutteet. RN-tukiasemat purkavat halutun signaalin, jonka jälkeen uudelleen koodaa sen ennen lähettämistä (Decode and Forward, DF). Tämän johdosta ne ovat hyvin soveltuvia häiriötä ja kohinaa sisältäviin olosuhteisiin, koska häiriötä ei vahvisteta, ja tällöin kyetään lisäämään järjestelmän kapasiteettia. [6, s. 27–28.]

Kuvasta 11 on myös havaittavissa kuinka RN-tukiasema on yhteydessä E-UTRAN-ilmajapinnasta (Uu) muunnetulla Un-radiorajapinnalla (relay link tai backhaul link) normaaliin tukiasemaan, jota kutsutaan nimellä Donor eNB (DeNB). DeNB jakaa osan ilmarajapinnan kapasiteetistaan yhdelle tai useammalle RN-tukiasemalle ja samalla kykenee palvelemaan omia käyttäjiään, eli sijainnista riippumatta päätelaitteet ovat joko RN- tai DeNB-tukiasemaan yhteydessä Uu-rajapinnan kautta (access link). [6, s. 27–28.] RN tukee suurilta osin samoja toimintoja kuin palveleva DeNB. Toki molemmat on spesifioitu sijainnin mukaan muun muassa naapuruuksien suhteen, ja vain DeNB on vastuussa MME:n valinnasta.

Uu- ja Un-rajapinnat voivat käyttää eri taajuuksia (outband). Tällöin Relay Node -tukiasemasta käytetään nimitystä Type 1a RN sekä vastaavasti samaa taajuutta (inband) käyttäessä nimityksenä on Type 1 RN [4]. Samaa taajuutta käyttäessä on suuri riski häiriöille RN-tukiasemassa kun vastaanotetaan Uu-rajapinnassa ja lähetetään Un-rajapinnassa samaan aikaan. Häiriöiden välttämiseksi voidaan jakaa aikatasot näiden Uu- ja Un-rajapintojen välillä, käyttää eri sijainteja lähettimelle sekä vastaanottimelle tai mahdollisesti soveltaa Carrier Aggregation (CA) -ominaisuutta, jos DeNB-tukiasemalta on tuki siihen. [4; 20, s. 35.]

### 3.4 Coordinated Multipoint

Osana LTE-A:n evoluutiota on Release 11 -määrittelyssä julkaistu sekä sen jälkeisissä määrittelyissä paranneltu CoMP-ominaisuus (Coordinated Multipoint), joka mahdollistaa enemmän yhtenäistä toimintaa eNodeB-tukiasemien välillä. Tärkeimpänä motivaationa ominaisuudelle oli lisätä verkon suorituskykyä solujen reunoille, mutta lisäksi myös parantaa yleistä laatua käyttäjille sekä tehostaa verkon resurssien käyttöä hyödyntämällä tiedonsiirroissa vähemmän ruuhkaisia tukiasemia [4]. Käyttäjien kokema laatu esiintyy parempina datansiirtonopeuksina, pienempinä häiriötasoina ja toisaalta yhtenäisen lähetyksen avulla kasvatetaan päätelaitteissa vastaanotettua tehoa. [22.]

LTE:n määrittelyissä (Release 8–10) päätelaitteet kommunikoivat yhden eNodeB:n kanssa kerrallaan, kun puolestaan CoMP-ominaisuuden avulla kyetään siirtämään tietoja useamman eNodeB:n kanssa yhtäaikaaisesti. CoMP-tiedonsiirtoa voidaan hyödyntää datan vastaanottamiseen useammalta tukiasemalta sekä myös vastaavasti datan lähettämiseen, jolloin useat vastaanottimet eri soluissa/sektoreissa kykenevät vastaanottamaan tietoja yksittäiseltä päätelaitteelta. CoMP-tiedonsiirrossa vastaanottavat sekä lähettävät antennit voivat sijaita eri paikoissa maantieteellisesti tai samassa paikassa tarjoten peittoa erilliselle sektoreille. [13, s. 25–26.] Downlink- sekä uplink-tiedonsiirtojen tekniikat eroavat CoMP-ominaisuuden käytössä johtuen siitä, että useat toistensa kanssa samassa verkossa olevat eNodeB-tukiasemat on yhteydessä yksittäisiin elementteihin eli päätelaitteisiin. [22.]

CoMP DL-tiedonsiirrossa kutsutaan yhteiseksi lähetykseksi (Joint Transmission, JT) tapahtumaa, kun vähintään kaksi lähetintä siirtää dataa yhteen tai useampaan päätelaitteeseen samaan aikaan yhteisellä taajuudella sekä samassa alikehyksessä. Samojen aika- sekä taajuusresurssien käyttö on erittäin tärkeä elementti CoMP-ominaisuutta, jotta naapurisolot eivät ole häiriöksi. Yhteinen lähetyks vaatii laajempaa kaistanleveyttä sekä pientä viivettä, millä käytännössä tarkoitetaan palvelevien eNodeB-tukiasemien välisen linkin rakentamista kuituyhteydellä. [4; 13, s. 26.] Palvelevien CoMP-ryhmän tukiasemien pitää olla tietoisia kaikkien päätelaitteiden kanavalaaduista ja tämän lisäksi päätelaitteelle siirrettävä data lähetetään jokaiselle tukiasemalle lisäten verkon datamäärä huomattavasti. [22.]

CS/CB (Coordinated scheduling and Beamforming) on puolestaan toinen vaihtoehto CoMP-ominaisuuden DL-tiedonsiirtoon, missä vain yksi lähetin siirtää dataa per aliehyys, vaikka dataa on saatavilla useammasta lähettimestä. CS/CB-tiedonsiirrossa päätelaitteen dataa siirretään vain yhdelle eNodeB-tukiasemalle ja tällöin verkossa kulkeva datamäärä on paljon vähäisempää kuin JT-tiedonsiirrossa. Ainut eNodeB-tukiasemien välinen informaatio on koordinoitujen aikataulutuksen tiedot sekä lähettimen esikoodaus, jotta vältetään solujen välisiltä häiriöiltä. [13, s. 25–26; 22.]

CoMP uplink -tiedonsiirroissa JT-tiedonsiirrolle vastaava menetelmä on Joint Reception (JR). JR-menetelmässä datan vastaanottavat eNodeB-tukiasemat on koordinoitu keskenään, minkä ansiosta on mahdollista luoda virtuaalinen antenniryhmä. Useampien tukiasemien antennit vastaanottavat datan päätelaitteelta, jonka jälkeen data yhdistetään ja käsitellään paremman laadun vuoksi. Tekniikan avulla kyetään vähentämään virheiden määrää alueilla, jossa ilmenee häiriöitä tai heikkoa signaalinvoimakkuutta. Kuten JT-tekniikassa JR-tekniikassa ilmenee ylimääräistä viivettä ja datamäärää, johtuen ominaisuuden mahdollistavasta tukiasemien välisestä kommunikoinnista. Lisäksi UL-tiedonsiirrossa voidaan käyttää vähemmällä verkon datamäärällä kuormittavaa, DL-tiedonsiirrossakin käytettyä CS-tekniikkaa, jolloin tukiasemien välinen liikenne rajoittuu aikataulutuksen dataan. [4; 22.]

### 3.5 Heterogeeniset verkkoratkaisut ja eICIC

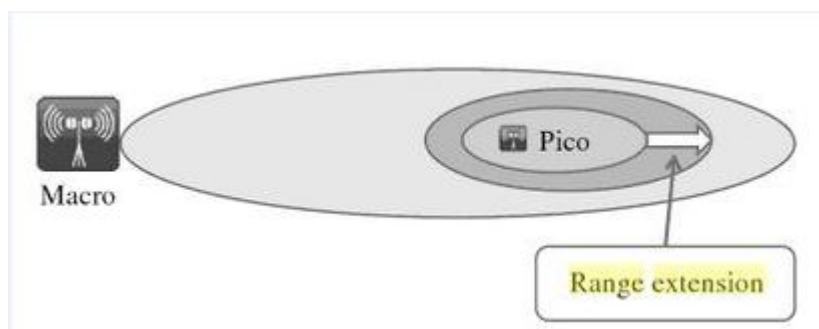
Jatkuva mobiililaajakaistatilaajien sekä datamäärien kasvu yhdistettynä rajallisten radioresurssien kilpailuun on korostanut verkkosuunnittelun tärkeyttä, jota on ratkaistu muun muassa uusilla radiospektreillä, moniantennitekniikoilla sekä tehokkaammilla modulaatioilla. Yksi tapa vastata datamäärän kysyntään on pienempien solujen luomisella täydentämään makrosolujen niin sanottuja hotspot-paikkoja, joissa on korkea käyttäjien kysyntä. Pienempien solujen avulla saadaan parempaa verkon suorituskykyä ja palvelulaatua, parannetaan radiospektrin käyttöä sekä myös pienennetään makrosolujen tehonkulutusta. Heterogeeninen verkko (Heterogeneous Networks, HetNet) on suurempien makrosolujen sekä pienempien solujen kombinaatio, mikä tuottaa korkeampia tiedonsiirtonopeuksia pinta-alayksikköä kohti. [23; 24.]

Pienempiä soluja varten olevia matalatehoisia tukiasemia suurimman tehon omaavasta pienimpään ovat: mikro-eNB, piko-eNB sekä femto-eNB, joka tunnetaan myös nimellä





solujen välistä häiriöitä. Peruseriaatteena on koordinoita häiriöitä aikatasossa lisäämällä osittain tyhjiä alikehyksiä (1 ms) eli ABS-alikehyksiä (Almost Blank Subframe). Vähemmällä teholla lähetetyt ABS-alikehykset sisällyttää ainoastaan signalointikanavia sekä CRS-referenssisignaaleja, eikä lainkaan esimerkiksi käyttäjädataa. Kun makrosolu käyttää ABS-alikehyksiä pienempi solu kokee vähemmän häiriöitä, minkä ansiosta se kykenee palvelemaan suurempaa maantieteellistä aluetta kuin normaalisti. Tällöin pienempi solu, kuten pikosolu käyttää suurempaa RE-arvoa (Range Extension) suurentaakseen palvelevaa peittoaluetta (kuva 13). Kuvassa 12 on kuvattu, kuinka ABS-alikehykset makrosolussa tarjoavat tehostettua käyttöä makro- ja pikosolun välille. eICIC:n käyttö korostuvat erityisesti, kun Carrier Aggregation (CA) ei ole käytössä. [6, s. 29, 370–372; 13, s. 24–25, 98; 23.]



Kuva 13. Range Extensionin (RE) käyttö ABS-alikehyksien yhteydessä [13, s. 98]

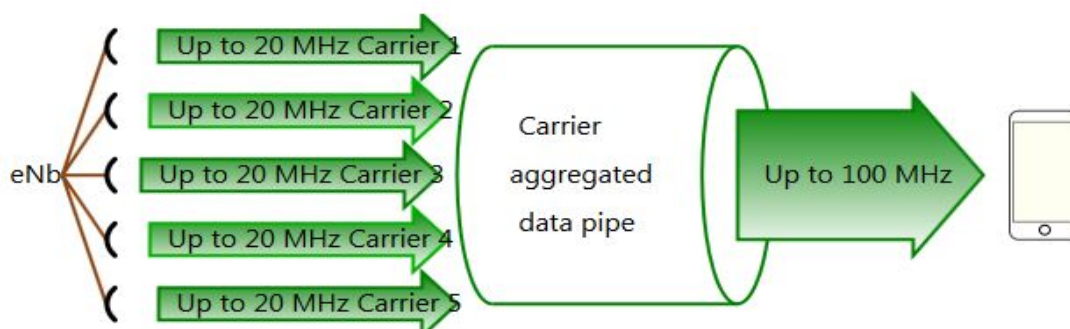
Tärkeänä elementtinä ja perustana heterogeenisille verkkoratkaisuille on runkoverkon rajapintaratkaisut eli backhaul. Pienemmät solukoot lievittävät radiorajapinnan ruuhkautumisia, mutta puolestaan kuormittavat backhaul-ratkaisuja ja sitä kautta myös runkoverkkoa itsessään. HetNet-konsepti vaatii koko verkolta tehokasta ja saumatonta toimintaa, mitä luodaan eri verkkoelementtien integroinnilla verkkoon. Monenkokoiset solut heterogeenisessä verkossa voivat olla yhteydessä MME:hen S1-rajapinnan kautta, ja kun esimerkiksi S1 on standardisoitu, yksiköt voivat olla monelta eri laitevalmistajalta. Rajapintojen standardointi on yksi tärkeistä tekijöistä HetNet-ratkaisuissa rajapintojen ope-  
rointien varmistamisessa, suorituskyvyn takaamisessa sekä sillä on myös suora vaikutus toiminta- ja pääomakustannuksiin. [24.]

## 4 Kantoaaltojen yhdistäminen

LTE-A:lle asetettujen datansiirtonopeusmääreiden saavuttamiseen ei riitä pelkästään spektritehokkuus, vaan tarvitaan lisäksi kaistanleveyden laajennusta. Ratkaisuna tähän on LTE-A-tekniikan merkittävin ominaisuus, Carrier Aggregation (CA). CA-ominaisuuden toiminta perustuu kaistanleveyden laajentamiseen downlink- sekä uplink-tiedonsiirrossa, mikä on mahdollista käyttämällä kahta tai useampaa kantoaaltoa samanaikaisesti. Ominaisuudessa käytetään Release 8 -määrittelyn kantoaaltoja, jotta myös LTE-A Release 10 -määrittelyä aikaisemmat päätelaitteet kykenevät käyttämään yhtä kantoaaltoa samalla kuin CA-tekniikkaan kykeneväiset päätelaitteet mahdollisesti kahta tai useampaa. [25; 26.] Seuraavissa luvuissa käydään läpi kantoaaltojen yhdistämisen toiminta.

### 4.1 Kantoaaltojen yhdistämisen peruseriaate

CA-ominaisuudessa käytettävistä yksittäisistä kantoaalloista käytetään nimitystä Carrier Component (CC), joten esimerkiksi DL-suunnassa kolmen kantoaallon yhdistämisestä käytetään nimitystä DL 3CC CA. Kantoaaltojen yhdistämisessä yksittäisen CC-kantoaallon kaistanleveys voi olla 1.4, 3, 5, 10, 15 tai 20 MHz, kuten LTE Release 8:ssa on määriteltä. Samassa CA-tiedonsiirrossa käytettävät CC-kantoaallot voivat olla kaistanleveysiltään erilaisia, esimerkiksi 10 MHz:n sekä 20 MHz:n kantoaaltoja. DL- että UL-tiedonsiirrossa yhdistettäviä kantoaaltoja voi olla yhteensä viisi kappaletta, joten CC-ominaisuuden kykeneväiselle, yksittäiselle päätelaitteelle maksimaaliseksi tiedonsiirron kaistanleveydeksi voidaan saada 100 MHz (5 x 20MHz). [25.] Kuvassa 14 on vielä havainnollistettu edellä mainittu kaistanleveyden laajennus 100 MHz:iin saakka.



Kuva 14. Viidellä 20 MHz:n Component Carrier -kantoaallolla saatu tiedonsiirron kaistanleveys päätelaitteelle [27]

CA-ominaisuus tuo suuria etuja kaikille solujen alueille ja erityisesti solujen reuna-alueille, päätelaitteen vastaanottaessa kahdelta tai useammalta erilliseltä taajuudelta. Lisäksi voidaan maksimoida suurempien taajuuksien käyttö. [13, s. 22.]

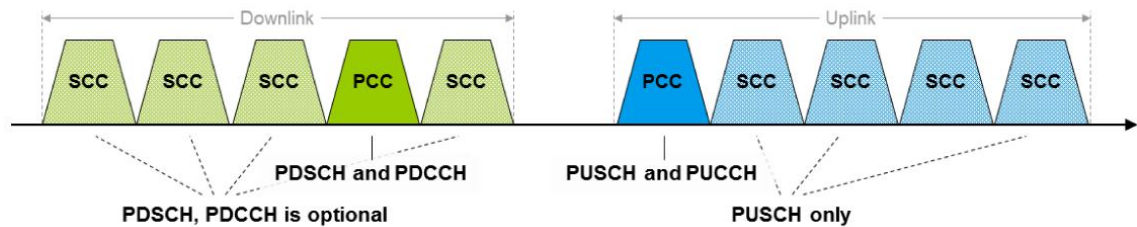
Kantaaaltojen yhdistämisessä voidaan käyttää taajuusjakoisen FDD-tekniikan (Frequency Division Duplex) lisäksi myös aikajakoista TDD-tekniikkaa (Time Division Duplex), joko erikseen tai samanaikaisesti. FDD on tekniikka, jossa lähetin ja vastaanotin toimivat eri kantaaaltotaajuuksilla, kun puolestaan häiriöille herkempi TDD kommunikoi DL- ja UL-suuntiin samalla taajuudella, mutta eri aikaväleissä. FDD-tekniikalla yhdistettävien kantaaaltojen määrä voi olla eri DL- ja UL-tiedonsiirtojen välillä, mutta UL-suunnan CC-kantaaaltoja ei kuitenkaan voi koskaan olla enemmän kuin DL-suunnan CC-kantaaaltoja. Puolestaan TDD-tekniikalla CC-kantaaaltojen määrä sekä niiden kaistanleveydet ovat yleensä samoja sekä DL- että UL-suunnille. FDD on yleisemmin käytetty ja sillä päästäänkin parempiin tiedonsiirtonopeuksiin. [4; 25.]

#### 4.2 Component Carrier -kantaaallot

CA-ominaisuutta käytettäessä palvelevia soluja on useampia, jokaiselle CC-kantaaallolle yksi. Palvelevien solujen peittoalue voi erota, koska CC-kantaaallot voivat olla eri taajuusalueilla, ja tämän vuoksi signaalit eroavat etenemisominaisuuksiltaan. Yhdistettäville CC-kantaaalloille on olemassa kaksi kategoriaa: Primary component carrier (PCC) sekä Secondary component carrier (SCC). CC-kantaaaltojen joukko on päätelaittekohtaisia, kun puolestaan RRC-yhteydestä vastaa aina yksi palveleva solu, josta käytetään nimitystä Primary serving cell (PCell) ja sitä palvelee DL/UL PCC-kantaaalto. Muista PCC-kantaaallon lisäksi käytettävistä CC-kantaaalloista käytetään nimitystä DL/UL SCC-kantaaalto. SCC-kantaaaltojen avulla lisätään kaistanleveyttä käyttämällä aina mahdolliseen neljään soluun asti, näistä palvelevista soluista käytetään nimitystä Secondary serving cell (SCell). Päätelaitteilla voi olla käytössä sama joukko CC-kantaaaltoja, mutta silti eri PCC-kantaaalto. PCell on aina RRC\_CONNECTED-tilassa, kun yksi tai useampi SCell on aktiivisena. [20; 25.]

RRC-yhteyden muodostamisen lisäksi DL PCC -kantaaallon kautta päätelaite vastaanottaa mobiliteetin ja istunnon hallinnan NAS-tiedot sekä vastaanottaa tietoja päätelaitteen ollessa lepotilassa. SCC-kantaaaltoja voidaan poistaa tai lisätä tarvittaessa, mutta PCC-kantaaalto vaihtuu ainoastaan solunvaihdon (handover) yhteydessä. [25.] DL PCC-

kantaaallolla kulkee downlink-suunnan fyysiset kanavat PDSCH sekä PDCCH ja vastaavat uplink-kanavat UL PCC-kantaaallolla: PUSCH ja PUCCH. Erona downlink- ja uplink-siirroille on se, että hallintatietoja kuljettava PDCCH on vaihtoehtoinen myös SCC-kantaaalloille downlink-siirrossa, kun puolestaan uplink-suuntaan vastaava PUCCH-kanava kuljetetaan ainoastaan PCC-kantaaallolla. Käyttäjätietoa puolestaan voidaan siirtää kaikilla kantaaalloilla. Kuvassa 16 on vielä selkeämmin kuvattuna näiden fyysisten kanavien siirto PCC- ja SCC-kantaaalloilla. [20.]



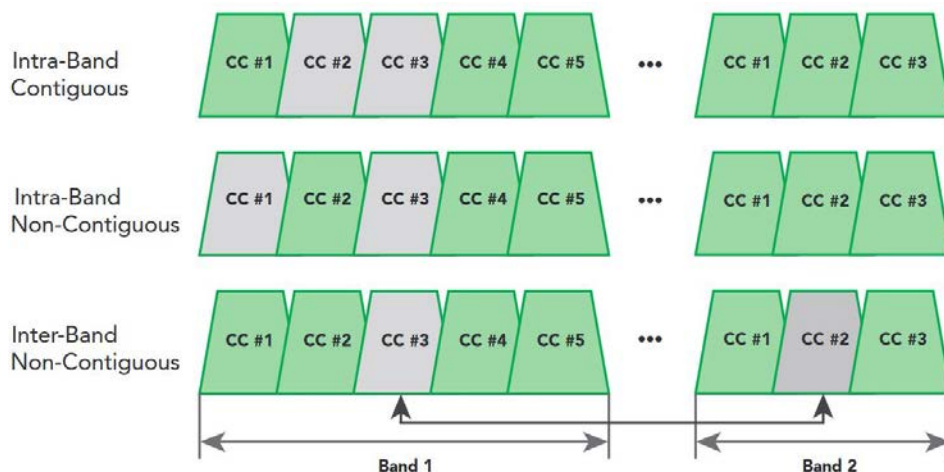
Kuva 15. PCC- ja SCC-kantaaalloissa kuljetettavat fyysiset kanavat [20].

#### 4.3 Carrier Aggregation -variaatiot

Tukien heterogeenisen verkon toteutusta kantaaaltojen yhdistämiselle on kolme eri tyyppiä, joilla pystytään täyttämään eri operaattorien taajuusskenaariot. Näistä operaattorille yksinkertaisin tapa on käyttää vierekkäisiä CC-kantaaaltoja samalla taajuuskaistalla, mistä käytetään nimitystä *Intra-band contiguous*. Tämä variaatio tuo kuitenkin omat haasteensa vaatiessaan operaattorilta yli 20 MHz:n kaistanleveyttä samalta taajuusalueelta, jonka vuoksi se ei ole aina käytettävissä oleva ominaisuuden muoto. Puolestaan päätelaitteen RF-näkökulmasta tämä voidaan nähdä yhtenä suurennettuna siirtokanavana, minkä vuoksi tarvitaan vain yksi lähetinvastaanotin, toisin kuin muissa variaatioissa. Kahden vierekkäisen CC-kantaaallon keskitaajuuksien väli on  $N \times 300 \text{ kHz}$ . [26; 28.]

CA-ominaisuudelle on vielä toinen toteutustapa, jossa käytetään vain yhtä taajuusaluetta. Tätä tapaa kutsutaan nimellä *Intra-band non-contiguous*. Tällä tavalla toteutetussa kantaaaltojen yhdistämisessä CC-kantaaallot sijaitsevat samalla taajuusalueella, mutta vierekkäisyyden sijaan käytettävät CC-kantaaallot ovat erillään. Tämän tilan käyttö on tarpeellista joissain tapauksissa, esimerkiksi kun yhden taajuusalueen allokoinnin omaa-

valla operaattorilla ei jostain syystä, kuten toisen operaattorin käytössä olevan taajuusalueen johdosta ole jatkuvaa allokointia kyseisellä taajuusalueella. Intra-band non-contiguous on vaikeampi toteuttaa päätelaitteen suhteen, koska siirtokanavaa ei voida käsitellä yhtenä signaalina ja vaatii näin ollen CC-kantoaalloille omat lähetinvastaanottimet. [13, s.20; 26.]

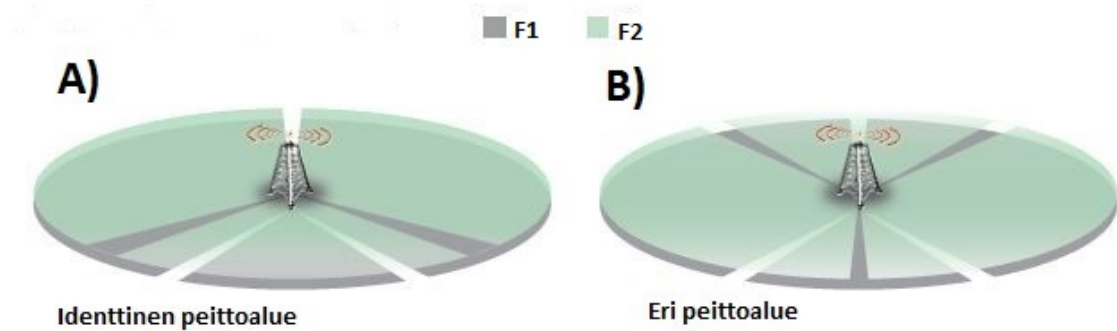


Kuva 16. CA-ominaisuuden allokointivariaatiot kahdelle CC-kantoaallolle [28].

Kolmas sekä yleisin kantoaaltojen yhdistämisen variaatio on *Inter-Band non-contiguous*, jossa CC-kantoaallot sijaitsevat eri taajuusalueilla, esimerkiksi Suomessa voitaisiin käyttää 1800 MHz:n sekä 2600 MHz:n taajuuksia. Tämäkin tapa vaatii päätelaitteelta useampaa lähetinvastaanotinta, mikä lisää muun muassa virrankulutusta. Kuvassa 16 on vielä havainnollistettuna kaikki kolme variaatiota toteuttaa kantoaaltojen yhdistäminen. [13, s.20.]

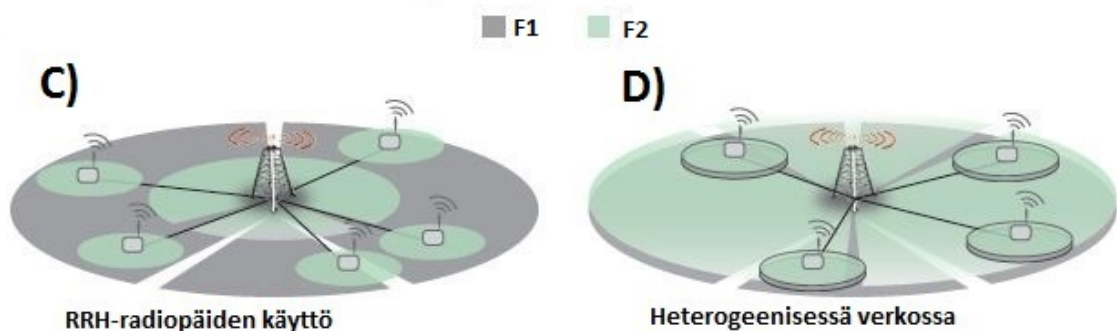
#### 4.4 Käyttöönottoskenaariot

Useiden mahdollisten taajuusalueiden käyttö CA-ominaisuudessa tuo operaattoreille suuren määrän eri käyttöönottoskenaarioita kun kyse on kantoaaltojen yhdistämisestä. CC-kantoaallot voidaan suunnitella kattamaan toisenlaisia peittoalueita muuttamalla solukokoja, suuntauksia tai esimerkiksi käyttämällä erillisiä, mutta silti makrosoluun integroituja RF-yksiköitä eli RRH-radiopäitä (Remote Radio Head). [25.]



Kuva 17. Identtisten sekä erillisten peittoalueiden toteutusskenaariot [28].

F1- ja F2-solujen erinäisen sekä identtisen peittoalueen omaavat skenaariot on havainnollistettu kuvassa 17. A-skenaariossa F1- sekä F2-solut ovat samalla sijainnilla ja samansuuntaisia, ja niillä on lähes identtiset peittoalueet, jolloin CA-ominaisuuden käyttö on mahdollista F1- sekä F2-solujen päällekkäisen peiton alueella. Tämä sopii erityisesti samalla taajuusalueella operoiville soluille, joilla on yhteneväiset signaalin etenemisominaisuudet. Samalla sijainnilla sekä suuntauksilla olevia soluja käytetään tämän lisäksi myös eri taajuusalueilla oleville soluille, esimerkiksi F1-solujen operoidessa 800 MHz:n ja F2-solujen 2600 MHz:n taajuusalueella. Tällöin toteutustavan F1-solut tarjoavat riittävää peittoaluetta ja puolestaan pienemmällä sekä solujen päällekkäisellä, eli F2-solujen peittoalueella pystytään nostamaan datansiirtonopeuksia kantoaaltojen yhdistämistä hyväksikäyttäen. B-skenaario toimii myös hyvin samalla taajuusalueella olevilla soluilla. Tässä toteutuksessa F1- sekä F2-solut ovat samalla sijainnilla, mutta F2-solun antennit ovat suunnattuna F1-solujen väliin, tämän ansiosta saadaan lisättyä peittoaluetta sekä suorituskkyä erityisesti solujen reuna-alueille. [28.]



Kuva 18. Mahdollisia käyttöönottoskenaarioita Inter-Band Non-Contiguous -variaatiolle [28].

Erilaisten taajuusalueiden käyttö antaa operaattoreille erinäisiä mahdollisuuksia toteuttaa kantoaaltojen yhdistäminen. Näitä ovat esimerkiksi kuvassa 18 esitetyt C- ja D-skenaariot. C-skenaariossa hyödynnetään radiopäitä siten, että F1-solut ovat pienemmällä taajuudella operoivia makrosoluja tarjoten laajempaa peittoaluetta ja suuremmalla taajuudella toimivia RRH-radiopäitä (F2) käytetään tarjoamaan korkeampaa kapasiteettia hotspot-alueille mahdollistaen myös CA-ominaisuuden hyödyntämisen päällekkäisillä peittoalueilla. Kyseisessä skenaariossa mobiliteetti perustuu F1-makrosolujen peittoalueeseen. Heterogeenisia verkkoratkaisuja (HetNet) hyödynnetään D-skenaariossa, jossa on useita pienempiä, kuten femto- ja piko-soluja. Toteutuksessa käytetään eri taajuuksilla A-skenaarion ratkaisua lisäten peittoalueelle toistimia, jotka operoivat toisella eNodeB-tukiaseman taajuuksista (F2) kasvattaen kyseisen taajuuden peittoaluetta. [28.]

#### 4.5 Kaistakombinaatiot

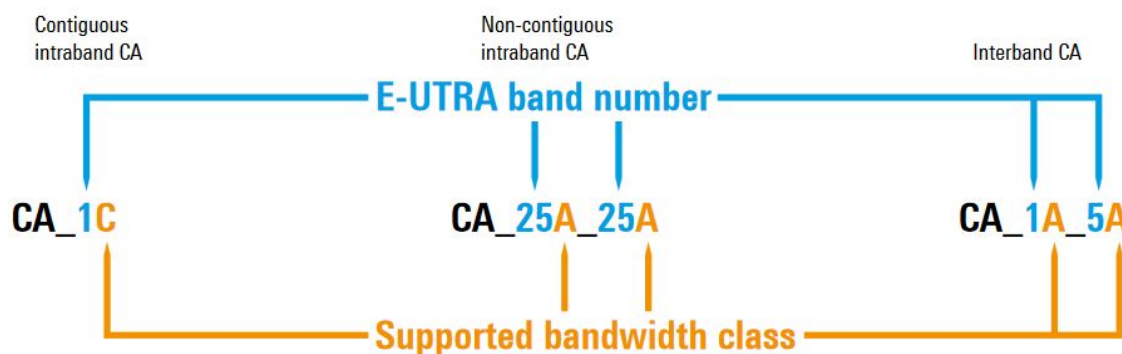
Jatkuva paine spektrin suhteen on kasvattanut sekä tulee kasvattamaan allokoitujen taajuusalueiden määrää. Kuitenkaan samoja taajuusalueita ei ole voitu jakaa globaalisti, mikä johtuu maakohtaisista sääntelyistä ja siksi taajuudet on allokoitu aluekohtaisesti. 3GPP:n määrittelemät, käytössä olevat E-UTRA taajuusalueet (FDD ja TDD) on numeroitu, joista esimerkkinä taulukossa 2 olevat, myös Suomen operaattoreilla: DNA Oy, Elisa Oyj ja Telia Finland Oyj käytössä olevat kaistat (800, 1800 ja 2600 MHz). Yleisestikin eurooppalaisille operaattoreille kyseiset taajuusalueet ovat tyypillisiä. [29.]

Taulukko 2. E-UTRA 3-, 7- ja 20-taajuusalueet [29].

Taajuus-numero	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)
3	1710–1785	1805–1880
7	2500–2570	2620–2690
20	832–862	791–821

Tämän lisäksi jokaiselle Carrier Aggregation -variaatiolle on erikseen määritelty, että mitä E-UTRA -taajuuksia on mahdollista käyttää kombinaatioissa. Nykyisin erilaisten kombinaatioiden määrä on erittäin kattava, mutta vielä esimerkiksi Release 10 -määrittelyn aikana Inter-Band -variaatiolle oli mahdollista yhdistää ainoastaan kaksi E-UTRA-taajuusaluetta. 3GPP:n Release 13 -määrittelystä lähtien on jo ollut viidenkin kantoaallon kombinaatioita downlink-suuntaan, kun Release 10 -määrittelyllä kyettiin vain kahteen kantoaaltoon.





Kuva 19. Päätelaitteen käyttämä terminologia sen tukemille kaistakombinaatioille [30].

CA-ominaisuuteen kykenevä päätelaite kommunikoi verkolle, mitä kaistakombinaatioita se tukee, jotka ilmoitetaan taajuusaluekohtaisesti sekä downlink- ja uplink-suunnille itsenäisesti. Kuvassa 19 on esitelty kaikkien kolmen CA-variaatioiden terminologia, esimerkiksi Inter-Band-variaatio CA\_1A\_5A, jossa päätelaite on kykeneväinen siirtämään kahdella, band 1- ja band 5 -taajuusalueen kantaalolla. Kyseisessä esimerkissä näkyvä A-kirjain edustaa tuettua kaistanleveysluokkaa, joka perustuu päätelaitteen tukemaan maksimaaliseen kantaaltokohtaiseen kaistanleveyteen resurssilohkoina (Resource Block, RB) sekä tuettujen kantaaltojen määrään. RB koostuu taajuuskanavoinnin, kuten OFDMA:n symboleista, yhden RB:n koko koostuu 180 kHz:stä taajuustasolla sekä 0.5 ms:n aikatasolla. A-luokan kantaalto sisältää maksimissaan 100 resurssilohkoa, mikä vastaa 20 MHz:n kaistanleveyttä. Tämä ja muut Release 14 -määrittelyn kantaaltoluokat ovat kuvattuna taulukossa 3. [28; 30.]

Taulukko 3. Päätelaitteen CA-kaistanleveysluokat [30].

CA-kaistanleveysluokka	Kaistanleveys (RB)	Maksimaalinen-kaistanleveys (MHz)	Maksimaalinen CC-kantaaltojen määrä
A	$N \leq 100$	20	1
B	$25 < N \leq 100$	20	2
C	$100 < N \leq 200$	40	2
D	$200 < N \leq 300$	60	3
E	$300 < N \leq 400$	80	4
F	$400 < N \leq 500$	100	5
I	$700 < N \leq 800$	160	8

#### 4.6 Vaikutukset korkeampien kerroksien radioprotokoliin

CA-ominaisuus vaikuttaa radioprotokollien näkökulmasta suurilta osin MAC-kerrokseen, joka vastaa yhdistettävien kantaaltojen kanavoinnista (multiplexing) eli käytännössä jaottelee datan sekä virheenkorjauksen HARQ-virheenkorjausmenetelmän avulla CC-kantaaltojen välillä. HARQ toimii fyysisellä kerroksella, mutta se kontrolloidaan MAC-kerroksessa. Tukiaseman MAC-tason skedulerilla (scheduler) pitää olla tietoa kaikista aktiivisista CC-kantaalloista vuoronnuksen suhteen, toisin kuin ennen LTE-A:n Release 10 -määrittelyä, jolloin tarvitsi käsitellä vain yhtä solukantaaltoa kerrallaan. MAC-skedulerin pitää huomioida muun muassa verkon kuormitustilanteen lisäksi päätelaitteelta raportoitu CQI-indikaattorin indeksiarvo, kun valitaan parhaiten sopivaa kantaaltoa. Kerrokset MAC-kerrosta ylempänä ei näe eroa aiempaan Release 8 -määrittelyn toimintaan muuten kuin että RLC-tason pitää tukea korkeampia datansiirtonopeuksia suuremmalla puskurikoolla sekä uudet RRC-viestit käsittelevät SCC-kantaaltoja. [3, s.492–494; 28.]

#### 4.7 Kantaaltojen yhdistämisen fyysinen kerros

Fyysisellä kerroksella on tärkeimmät Release 8 -määrittelyn ominaisuudet, kuten jokaiselle CC-kantaallolle erikseen suoritettu modulointi, koodaus ja resurssien allokointi. CC-kantaaltojen yhdistämisen sulavuuden takaamiseksi on kuitenkin tehty parannuksia myös fyysiselle kerrokselle. Pääasialliset kantaaltojen yhdistämisen vaikutukset fyysiseen kerrokseen liittyvät useiden kantaaltojen palautekonstruktioihin, mutta muutoksia on myös tämän ohessa tehty esimerkiksi yksittäisen uplink-kantaallon ei-vierekkäisten PUCCH/PUSCH- sekä PUSCH/PUSCH-allokointien myötä. [3, s.493.] Seuraavissa luvuissa käydään läpi fyysisen kerroksen ohjaussignaloinnin sekä kanavalaadun näkökulmasta downlink- ja uplink-tiedonsiirrot.

##### 4.7.1 Downlink

Downlink-tiedonsiirrossa CC-kantaaltojen operointi on hyvin samanlaista kuin aikaisemmissa LTE-määrittelyissä, mutta kuitenkin yhtenä tärkeimpänä muutoksena on kantaaltojen vuoronustietojen signalointi, koska päätelaite tarvitsee allokointiedot kaikista käytettävissä olevista CC-kantaalloista. Häiriöiden välttämiseksi uutena ominaisuutena on suunniteltu *cross-carrier scheduling*, jonka avulla kyetään dynaamisesti vuoronta-

maan käyttäjät kantoaaltotasolla. Tämän ominaisuuden kanssa voidaan vuorontaa resursseja SCC-kantoaallolle, jolla ei ole PDCCH:ta. Tällöin PCC-kantoaallon PDCCH-kanavan CIF (Carrier Indicator Field) osoittaa vuoronnettujen resurssien sijainnin eli soluindeksin [25]. CIF-arvo sijaitsee DCI-tiedoissa (Downlink Control Information) ja se informoidaan päätelaitteelle PDCCH-kanavan kautta. DCI kontrolloi kaikkea fyysisen kerroksen resurssien allokointia sekä downlink- että uplink-suuntiin ja sillä on monta muotoa eri tarkoituksiin. [26.]

Kanavalaadun takaamiseksi CA-ominaisuuden ollessa käytössä edellytetään tiedonsiirto-kanavan laadun eli CQI-indeksin raportointia jokaiselle CC:lle erikseen. CQI ja HARQ-virheenkorjausmenetelmän tilat (ACK/NACK) välitetään eNodeB-tukiasemalle PUCCH- tai PUSCH-kanavalla. ACK-palautteen saadessa lähetetään seuraava data ja NACK-palautteen myötä HARQ prosessoi uudelleenlähetyksen olemassa olevalle datalle. [28.]

#### 4.7.2 Uplink

LTE-A:n tuomat tuet useampaan kuin yhteen uplink-suunnan kantoaaltoon vaati määrittelemään selkeitä muutoksia fyysisen kerroksen rakenteeseen ja ohjaussignaalointiin. Syynä muutoksille on tarve tukea epäsymmetrisiä downlink- ja uplink-kantoaaltoja sekä päätelaitteiden lähetystehorajoitukset. Release 8 -määrittelystä poiketen ainoastaan PCell-solussa kuljetettavaan ja ohjaussignaaloinnista vastaavaan PUCCH-kanavaan spesioitiin täysin uusi formaatti (format 3) tukemaan lisääntyneeseen määrään HARQ-virheenkorjausmenetelmän ACK/NACK-tietosisältöön. Aiemmin Release 8 -määrittelyn PUCCH-kanavan formaatti (1b) kykeni tukemaan vain neljää bittiä, kun puolestaan uudella formaatilla pystytään täyttämään HARQ-virheenkorjausmenetelmän vaatimukset kymmenen ACK/NACK-bittiä FDD-tekniikalle ja 20-bittiä TDD-tekniikalle. [28.]

Uutena elementtinä myös on mahdollisuus lähettää PUCCH- ja PUSCH-kanavat samanaikaisesti, mikä antaa enemmän edellytyksiä taajuuskohtaiselle vuorontamiselle verrattuna aiempaan vain jatkuvaan allokointiin. Samanaikainen lähettäminen usealla kantoaallolla voi aiheuttaa sen, että ylitetään päätelaitteen maksimiteho-ominaisuudet. Ratkaisuna tähän on PUCCH-kanavan sekä yhden tai useamman yksittäisen PUSCH-kanavan tehonsäätö aktiivisten kantoaaltojen kesken, jolloin päätelaitteen lähettimen lähtötehoa voidaan optimoida muuttamalla sitä dynaamisesti. Esimerkiksi päätelaitteen saavuttaessa maksimaalisen lähetystehon, tehon vähentämisen yhteydessä saatetaan joutua

priorisoimaan ohjaussignalointi, mikä asettaa PUCCH-kanavan korkeimmalle prioriteetille ohi käyttäjädataa kuljettavan PUSCH-kanavan. Kantoaaltojen yhdistämisessä aktiiviset UL CC-kantoaallot voivat kokea hyvin erilaisia radiokanavaolosuhteita kuten taajuuden sekä häiriöiden suhteen, minkä vuoksi on tärkeää, että jokaiselle erilliselle kantoaallolle raportoidaan yksilöllinen tehonsäätö. Uplink-lähetysten tehonsäätöä hallinnoidaan uplink TPC:n (Transmit Power Control) komennoilla, PUCCH-kanavan TPC-komennot vastaanotetaan aina PDCCH-kanavan kautta. [3, s.493–494; 28.]

#### 4.8 Mobiliteetti

Aktiivisessa CA-istunnossa on ainoastaan yksi RRC-yhteys, koska eri CC-kantoaallot eivät toimi yksinäisesti. RRC-yhteyden muodostaa PCell-solu (PCC), jonka jälkeen palveleva eNodeB-tukiasema voi määritellä sopivien SCell-solujen (SCC) lukumäärän päätelaitteen kyvykkyyksien sekä radio-olosuhteiden mukaan. SCell-soluja ei voida aktiivoida samalla hetkellä kun RRC-yhteys muodostetaan, koska SCell-soluille ei ole säännöstelty RRC-yhteyden muodostamista (RRC Connection Setup). SCell-solujen lisääminen ja poistaminen palvelevien solujen joukosta toteutuvat RRC-yhteyden uudelleenkonfiguroinnilla (RRC Connection Reconfiguration), samalla proseduurilla myös suoritetaan solujen vaihdot ja mittaukset sekä muodostetaan radiosignaalin kantajat Control- ja User Plane -yhteyksille.

Mobiliteetti pohjautuu PCell-solun mittauksiin, RRC-tason viesteihin sekä mahdolliseen yhteyden uudelleen muodostamiseen (RRC Connection Re-establishment). Tämän toiminteen saa aikaiseksi vaikka solunvaihdon epäonnistuminen tai heikko radiosignaali. Puolestaan tämän tyyppiset radorajapinnan epäonnistumiset SCell-solussa eivät aiheuta RRC-yhteyden uudelleen muodostamista. PCell-solu vaihtuu ainoastaan solun vaihdon yhteydessä. Toiminteen aikana ei ole aktiivisia SCell-soluja. Solua vaihdetaan, jos RRC\_CONNECTED-tilassa oleva päätelaite havaitsee PCell-solun mittauksissa tarvetta sille tai vaihtoehtoisesti verkon toimesta, jos esimerkiksi tasataan radioverkon kuormitusta. Solunvaihdon yhteydessä eNodeB-tukiasema lähettää säännöllisesti päivitetyn, radio-olosuhdemittauksiin perustuvan listan mahdollisista SCell-soluista tulevalle eNodeB-tukiasemalle, joka käyttää listaa solunvaihdon jälkeen palvelevien solujen valinnassa. Mittauksien tärkeimpinä radio-olosuhdemittareina toimii vastaanotetun signaalin taso (Reference Signal Received Power, RSRP) sekä kyseisen signaalin laatu (Reference Signal Received Quality, RSRQ). [3, s.494–495; 20; 28.]

#### 4.9 Suorituskyky

LTE-Advancedin merkittävänä uudistuksena olevan Carrier Aggregation konkretisoituu käyttäjien kokemaan datansiirtonopeuteen, mitä pitävätkin yleisesti verkon laadun mittarina. Tiedonsiirron nopeuteen vaikuttavat muutamien tekijät selkeästi, tärkeimpinä tiedonsiirtoon käytetty kaistanleveys, MIMO-tekniikka, modulaatio, verkon kuormitus sekä käytetäänkö korkeampiin datanopeuksiin kykenevää FDD-tekniikkaa TDD:n sijasta. Data-nopeutta mitataan usein fyysisen kerroksen PDSCH/PUSCH-kanavista, koska tällöin voidaan erotella nopeudet CC-kantaaaltokohtaisesti. Todellinen, käyttäjän kokemana nopeus koetaan kuitenkin sovelluskerroksessa, koska fyysisen kerroksen kanavissa kulkee käyttäjätietojen lisäksi ylempien kerroksien signaalitietoja. Tämän vuoksi käyttäjien kokemana datanopeus on hieman pienempi kuin fyysisellä kerroksella koettu. [3, s.493–495.]

Taulukossa 4 on havainnollistettu kanta-aaltojen yhdistämisen tuomat teoreettiset DL-tiedonsiirtonopeudet, kaistanleveyden, MIMO-tekniikan sekä modulaation mukaan eroteltuna. Käytännössä huippunopeudet vaativat erinomaisia radio-olosuhteita. Kuten taulukosta 4 voidaan huomata, MIMO-tekniikan nostamisella 2x2 MIMO -tekniikasta 4x4 MIMO-tekniikkaan tai vastaavasti kaistanleveyden tuplaamisella kyetään kaksinkertaistamaan datansiirtonopeus. DL-modulaation nosto 16QAM:sta 64QAM:iin datansiirtonopeus kertaantuu noin 2.4-kertoimella ja puolestaan 64QAM:sta 256QAM:iin saadaan datansiirtonopeutta nostettua 1.33-kertoimella. [31, s.11–12.]

Taulukko 4. Teoreettisia PDSCH-kanavan DL-tiedonsiirtonopeuksia (FDD) eriävillä kaistanleveyksillä, MIMO-tekniikoilla sekä modulaatioilla.

		10 MHz	20 MHz	40 MHz	60 MHz	80 MHz	100 MHz
2x2 MIMO	16QAM (Mbit/s)	30.5	61.2	122.3	183.5	244.6	305.8
	64QAM (Mbit/s)	73.4	150.8	301.5	452.3	603.0	753.8
	256QAM (Mbit/s)	97.9	195.8	391.6	587.4	783.2	979.0
4x4 MIMO	16QAM (Mbit/s)	61.1	122.3	244.6	366.9	489.2	611.5
	64QAM (Mbit/s)	146.8	301.5	603.0	904.5	1206.0	1507.5
	256QAM (Mbit/s)	195.7	391.6	783.2	1174.8	1566.3	1958.0
8x8 MIMO	16QAM (Mbit/s)	122.1	244.6	489.2	733.8	978.4	1223.0
	64QAM (Mbit/s)	293.6	603.0	1206.0	1809.0	2412.0	3015.0
	256QAM (Mbit/s)	391.6	783.2	1566.3	2349.5	3132.7	3915.8

## 5 Suorituskykymittaukset

Tässä luvussa käydään läpi käytännössä tehdyt kantoaaltojen yhdistämisen mittaukset DL-tiedonsiirrossa, jotta voidaan verrata CA-ominaisuuden hyötyjä mobiiliverkon tiedonsiirtonopeuksissa. Radio-olosuhteita kuvaavat muun muassa RSRP ja SNR, jotka mahdollistavat QAM-modulaation sekä MIMO-tekniikan käytön. Nämä puolestaan vaikuttavat suoraan fyysisen kerroksen ja sitä kautta myös sovelluskerroksen tiedonsiirtonopeuksiin. Ensimmäiseksi käydään läpi työkalut, jotka mahdollistivat mittaukset sekä käytetyt menetelmät suorituskykymittausten suorittamisessa. Lisäksi mittaustulokset arvioidaan sekä verrataan keskenään käyttäen KPI-suorituskykymittareita.

### 5.1 Tekniikka ja menetelmät

CA-mittaukset suoritettiin LTE-A-verkossa 7. marraskuuta 2017. Kaikki tehdyt mittaukset suoritettiin samassa sijainnissa Helsingissä, missä etäisyys eNodeB-tukiaseman antenneihin oli noin 30 metriä ja antennin sekä päätelaitteen välissä ainut fyysinen este oli ikkuna. Lisäksi tukiaseman yleinen liikenne oli vähäistä, koska mittaukset suoritettiin erittäin aikaisin aamulla. Palvelevassa eNodeB-tukiasemassa oli kolme LTE-taajuutta käytössä: 2600 MHz (B7), 1800 MHz (B3) sekä 800 MHz (B20). 800 MHz:n taajuudessa oli käytössä kaistanleveyttä 10 MHz, kun puolestaan 2600- ja 1800 MHz:n taajuuksissa 20 MHz. Tukiasema tuki myös 4x4 MIMO-tekniikkaa sekä 2600- että 1800 MHz:n taajuuksilla, 800 MHz:n käyttäessä vain 2x2 MIMO-tekniikkaa. Kaikilla kolmella taajuudella voitiin käyttää 256QAM-modulaatiota. Verkon käyttöönottoskenaario toimi luvun 4.4 A-skenaario eli solut olivat samalla sijainnilla ja suuntauksilla.

Päätelaitteena mittauksissa toimi Samsung Galaxy S8, joka kuuluu UE-kategorian 16 - päätelaitteisiin, joka käytännössä tarkoittaa sen kykenevän maksimissaan 1000 Mbit/s tiedonsiirtonopeuteen DL-suuntaan käyttämällä 256QAM-modulaatiota sekä 4x4 MIMO-tekniikkaa. Päätelaitteessa olevan Nemo Handy -ohjelman avulla pystyttiin taltioimaan radiorajapinnan parametrit, joita voitiin myöhemmin tarkastella sekä analysoida Nemo Analyze -työkalulla. Nemo Analyze -työkalulta tuotiin parametrikohtaista dataa Microsoft Exceliin ja sitä kautta kaavioihin. Mittaukset suoritettiin Nemo Handy -ohjelmalle tehdyllä skriptillä, minkä avulla päätelaite lataa neljän gigatavun tiedoston FTP-palvelimelta. Kunkin mittauksen datat on taltioitu kyseisen tiedoston lataamisajalta ja tästä johtuen voidaan myös verrata mittauksissa käytettyä aikaa tiedoston lataamiseen.

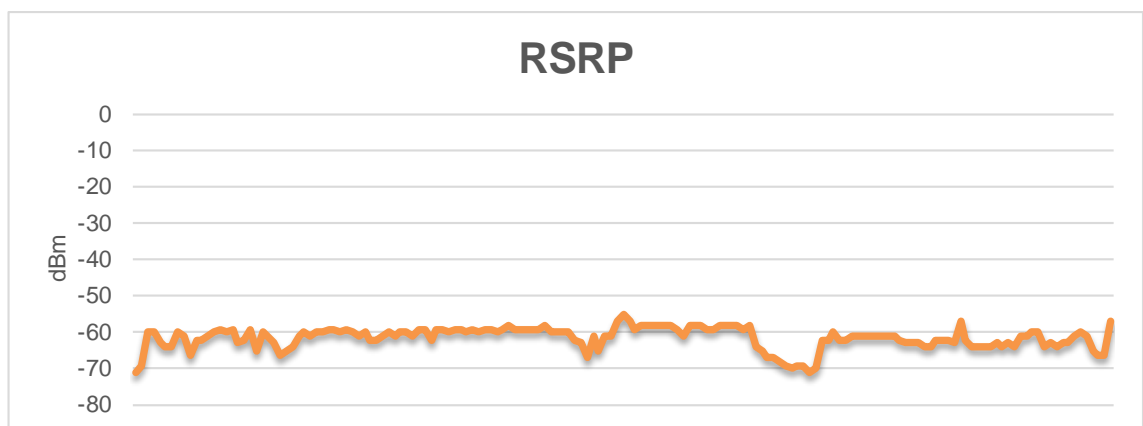
## 5.2 Käytännön mittaukset

DL-tiedonsiirron suorituskykymittauksia tehtiin kolme kappaletta: yhdellä, kahdella sekä kolmella kanta-aallolla. Päätelaitteen tukemat kaistakombinaatiot rajoittivat myös mittauksia, eikä esimerkiksi kolmen kanta-aallon (3A\_7A\_20A) tiedonsiirrossa voitu käyttää 4x4 MIMO -tekniikkaa. Kahden kanta-aallon (7A\_20A) kombinaatiossa sekä päätelaitteen että tukiaseman kyvyt rajoittivat 4x4 MIMO-tekniikan käytön vain 2600 MHz:n taajuudelle, kyseistä taajuutta käytettiin myös yhden kanta-aallon mittauksessa. Hyvissä radio-olosuhteissa sekä kuormituksen ollessa vähäistä PCell-soluksi priorisoidaan suurempaa taajuutta ja mittauksissa se selkeästi näkyi, kun PCell-soluna toimi 2600 MHz (B7).

### 5.2.1 Yhden kanta-aallon mittaus

Yhden kanta-aallon mittaus suoritettiin B7-kaistalla (2600 MHz), jolloin käytössä oli 20 MHz:n kaistanleveys. Käytettävistä olevista taajuuksista B7 hyödyntää suurempia siirto-lohkoja (TB) verrattuna pienempiin taajuuksiin, ja tästä johtuen kyseinen taajuus valittiin tähän yhden kanta-aallon mittaukseen eli päätelaite lukittiin käyttämään vain B7-taajuutta. 4x4 MIMO-tekniikan ja 256QAM-modulaation ollessa käytössä, voidaan teoriassa ylittää 391,6 Mbit/s tiedonsiirtonopeuksiin PDSCH-kanavalla.

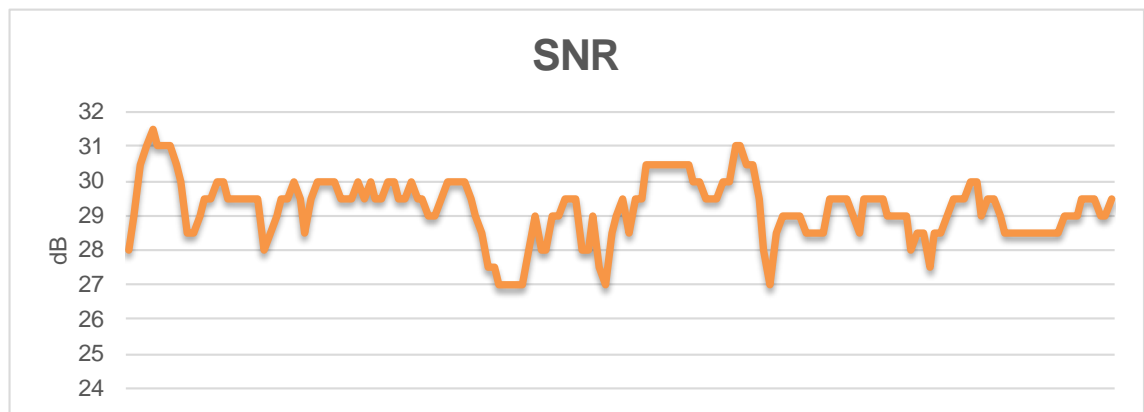
Yhtenä radio-olosuhteiden hyvänä indikaattorina voidaan pitää RSRP-viivadiagrammia (kuva 20), jolla ilmaistaan vastaanotetun referenssisignaalin tasoa. Heikommat radiotien etenemisominaisuudet omaavalta 2600 MHz:n kanta-aallolta referenssisignaali vastaanotettiin keskimäärin tasolla -61 dBm.



Kuva 20. RSRP-taso yhden kanta-aallon mittauksessa.

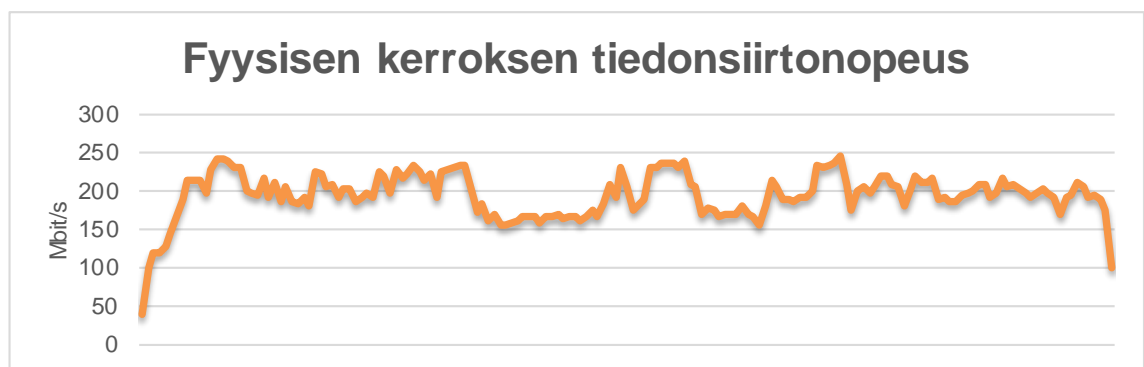
Loistavista radio-olosuhteista kertoo se, että yleisesti erittäin hyvänä tasona pidetään jo -80 dBm tason ylittävää signaalia. Heikoimmillaan vastaanotetun signaalin taso oli -71 dBm.

Toisena tärkeänä radio-olosuhteiden parametrina pidetään vastaanotetun signaalin signaali-kohinasuhdetta (SNR), joka kuvastaa signaalin laatua. Yleisesti hyvänä arvona pidetään jo yli 20 dB:n arvoa, mutta mitä lähempänä 32 dB arvoa ollaan, sen parempi. Yhden kantoaallon mittauksissa koettiin keskimäärin 29 dB ja heikoimmillaan 27 dB:n SNR-arvoa, joten voidaan myös tämän osalta todeta radiorajapinnan olosuhteiden olleen lähes täydelliset. Kuvassa 21 on vielä havainnollistettu SNR-arvot tiedoston lataamisen ajalta.



Kuva 21. SNR-arvot yhden kantoaallon mittauksissa.

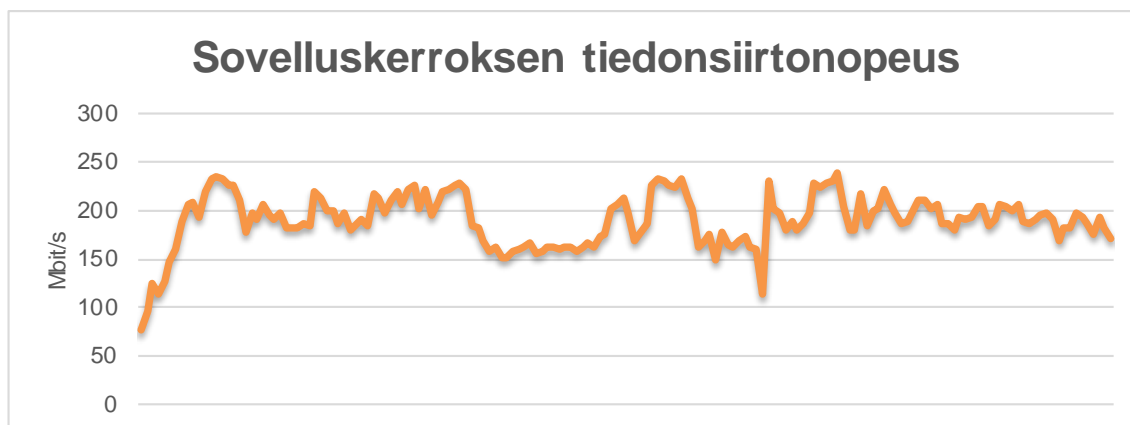
Loistavien SNR-arvojen vuoksi tiedonsiirrossa kyettiin käyttämään 256QAM-modulaatiota 93 % ajasta ja muut 7 % ajasta käytössä oli 64QAM-modulaatio. Lisäksi 4x4 MIMO -tekniikka oli 98 prosenttisesti käytössä.



Kuva 22. Fyysisen kerroksen tiedonsiirtonopeus yhdellä 2600 MHz:n kantoaallolla.



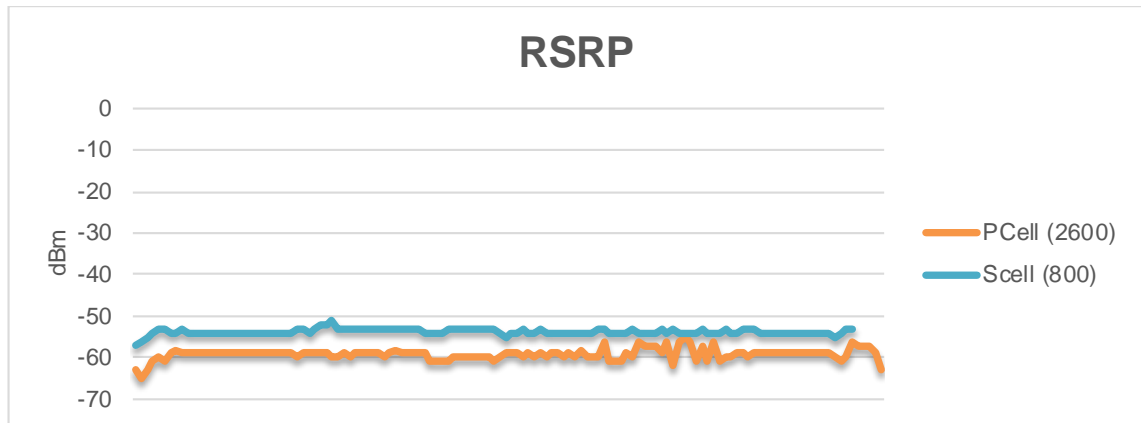
Vaikka 4x4MIMO-tekniikka sekä 256QAM-modulaatio oli lähes koko tiedoston lataamisen ajan käytössä, jäätiin silti teoreettisista maksiminopeuksista kauas, kuvassa 22 esitettynä fyysisen kerroksen eli PDSCH-kanavan nopeus. Maksimissaan päästiin 246 Mbit/s nopeuteen fyysisellä kerroksella ja keskimäärin nopeus oli 196 Mbit/s. Vastaavasti varsinaisen käyttäjän kokeman eli sovelluskerroksen maksimaalinen tiedonsiirtonopeus oli 239 Mbit/s ja keskiarvolta 190 Mbit/s (kuva 23). Aikaa 4 Gt:n tiedoston lataamiseen meni kaiken kaikkiaan 2 minuuttia ja 48 sekuntia.



Kuva 23. Sovelluskerroksen tiedonsiirtonopeus yhdellä kantoaallolla (B7).

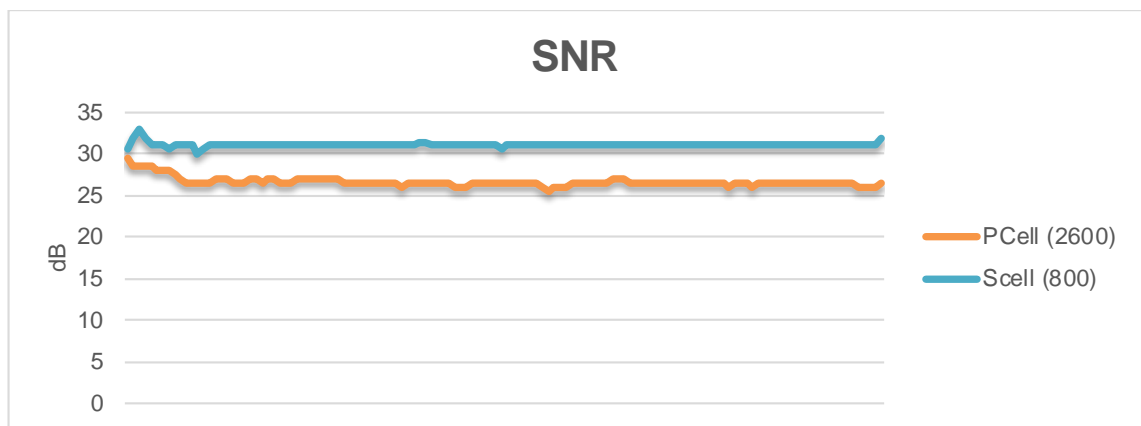
### 5.2.2 Kahden kantoaallon mittaus

DL 2CC CA -mittauksessa kaistakombinaationa toimi 7A\_20A, B7 (2600 MHz) toimi PCell-soluna ja SCell-soluna B20 (800 MHz). B7-kantoaallolla oli tukiaseman sekä päätelaitteen puolesta tuki 4x4 MIMO-tekniikalle tässä kaistakombinaatiossa, puolestaan B20-kantoaallolle tuki vain 2x2 MIMO-tekniikalle. Allokoitua kaistanleveyttä oli 2600 MHz-taajuusalueella 20 MHz ja 800 MHz:n taajuusalueella puolet tästä, eli 10 MHz. Kokonaiskaistanleveys oli tässä mittauksessa näin ollen 30 MHz. Teoriassa B7-kantoaallolla pystyttäisiin 256QAM-modulaatiota hyödyntäen saamaan 391,6 Mbit/s tiedonsiirtonopeuksia ja puolet kapeammalla kaistaleveydellä sekä 2x2 MIMO-tekniikalla ja 256QAM-modulaatiolla operoivalla B20-kantoaallolla teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus PDSCH-kanavalla on 97,9 Mbit/s. Kantoaaltojen yhdistämisellä voidaan saada siis teoriassa 489,5 Mbit/s fyysisen kerroksen nopeuksia.



Kuva 24. RSRP-tasot DL 2CC CA -mittauksessa.

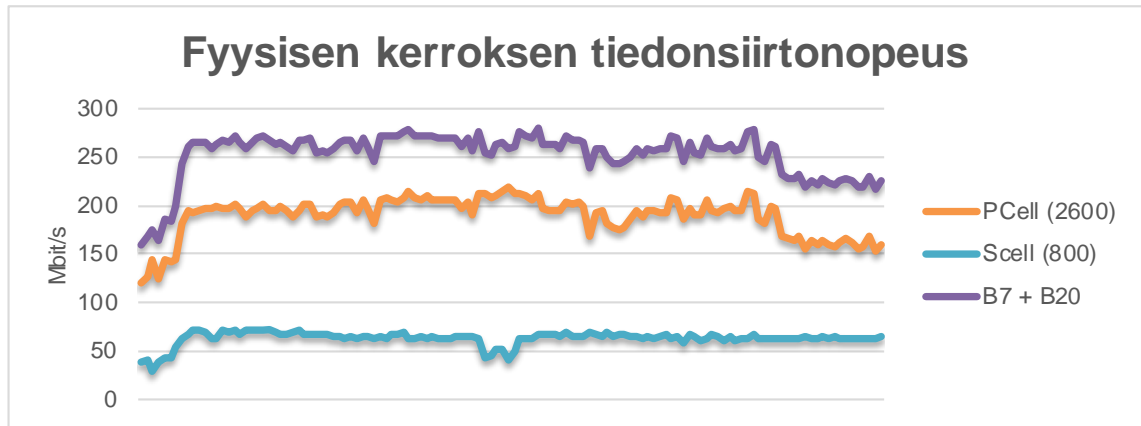
Teoreettisten maksiminopeuksien saavuttamiseen vaadittavia RSRP-tasoja saatiin molemmille taajuuksille ja oletettavasti paremmat signaalin vastaanottotasot olivat matalammalla B20-taajuudella, johtuen paremmista signaalin etenemisominaisuuksista (kuva 24). Keskimääräinen RSRP-taso PCell-solulla oli -59 dBm ja SCell-solulla -54 dBm. Häiriöt muista lähettimistä olivat erittäin vähäisiä, mikä voidaan nähdä SNR-arvoja havainnollistavat viivadiagrammista (kuva 25). PCell-solun keskimääräinen SNR-arvo oli 26 dB ja vastaava arvo SCell-solulle oli lähes täydellinen, 31 dB.



Kuva 25. Loistavat signaali-kohinasuhteet DL 2CC CA -mittauksessa.

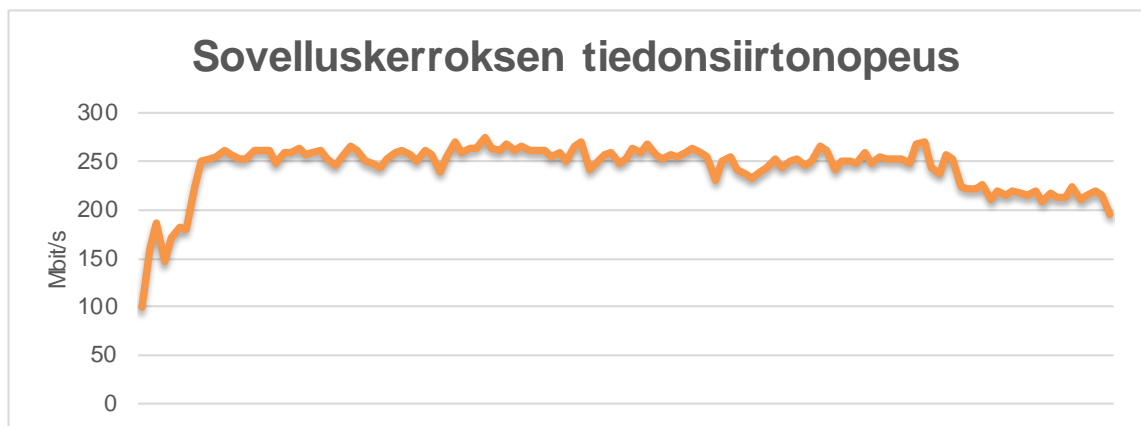
Molemmilla taajuuksilla saatiin niiden maksimaalinen moniantennitekniikan hyöty käyttöönsä koko tiedoston lataamisen ajan, PCell-solulla 4x4 MIMO ja SCell-solulla 2x2 MIMO. Modulaation suhteen nähtiin pieni haasteita PCell-solulla, mikä oli nähtävissä 73 %:n 256QAM-modulaation käytössä. Vastaava käyttöaste SCell-solulla oli 100 %.

Kuten yhden kantoaallon mittauksessa, niin myöskään tässä ei päästy lähellekään teoreettisia maksiminopeuksia hyvissäkään radio-olosuhteissa (kuva 26). PCell-solun huipunopeus fyysisellä kerroksella oli 219 Mbit/s, SCell-solulla 72 Mbit/s ja CA-ominaisuutta hyödyntäen maksimaaliseksi PDSCH-tiedonsiirtonopeudeksi saatiin 280 Mbit/s.



Kuva 26. PDSCH-tiedonsiirtonopeus DL 2CC CA -mittauksessa.

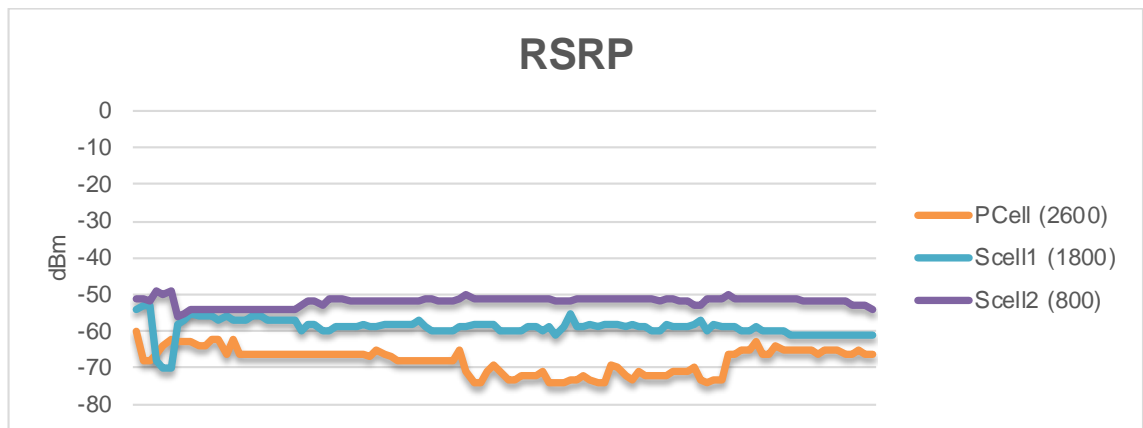
Fyysisen kerroksen odotettua hitaammat tiedonsiirtonopeudet tietenkin peilautuivat myös sovelluskerrokseen (kuva 27), jossa koettiin keskimäärin 243 Mbit/s ja parhaimmillaan 275 Mbit/s nopeuksia. Tiedoston lataamiseen näillä nopeuksilla meni aikaa 2 minuuttia ja 11 sekuntia.



Kuva 27. DL 2CC CA -mittauksissa koetut tiedonsiirtonopeudet sovelluskerroksella.

### 5.2.3 Kolmen kanta-aallon mittaus

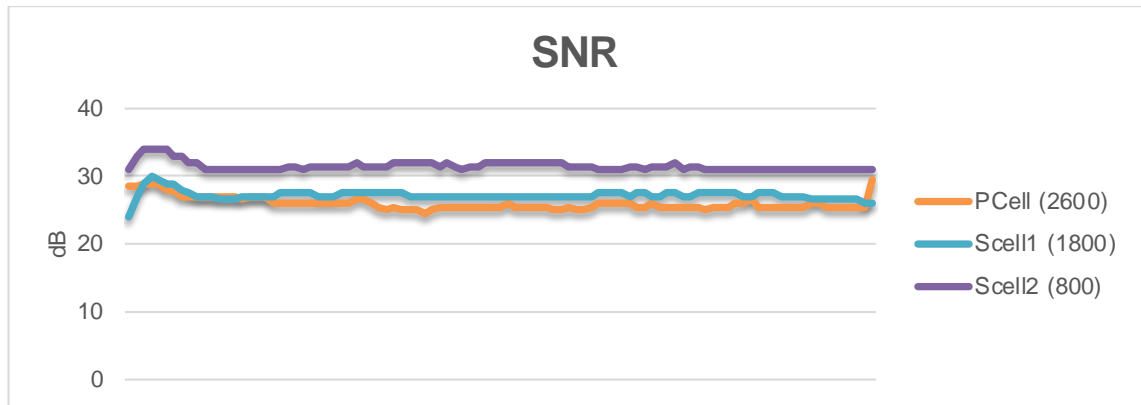
Kolmea kanta-aaltoa (DL 3CC CA) hyödyntäessä käytössä oli kaistakombinaatio 3A\_7A\_20A, eli lisättynä oli vielä 1800 MHz:n taajuus verrattuna 2CC-mittauksiin. Pääteläite ei tukenut kolmen kanta-aallon kaistakombinaatiossa 4x4 MIMO-tekniikan käyttöä, joten B3 ja B7 kykeni 20 MHz:n kaistanleveyksillä teoriassa 195,8 Mbit/s nopeuteen per taajuusalue ja puolestaan 10 MHz:n B20-taajuus puoleen tästä, eli 97,9 Mbit/s. Tällöin maksimaalinen PDSCH-tiedonsiirtonopeus tällä kombinaatiolla on sama kuin 2CC-mittauksessa eli 489,5 Mbit/s, johtuen 4x4 MIMO-tekniikan puuttumisesta.



Kuva 28. DL 3CC CA -mittauksen RSRP-tasot.

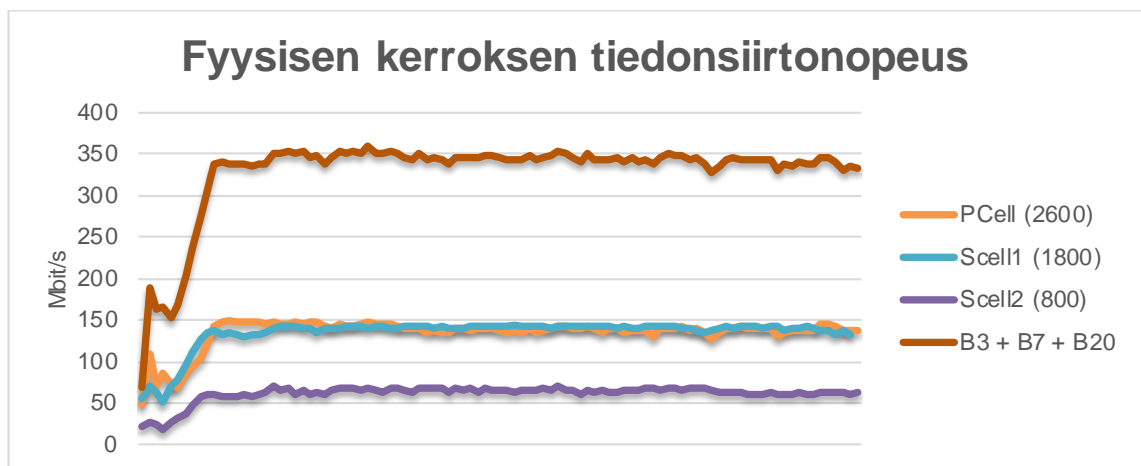
Kuten edellisissä mittauksissa, niin myös tässä kolmen kanta-aallon tuloksista on havaittavissa, kuinka vastaanotettavan signaalin RSRP-tasot paranevat mitä pienemmälle taajuudelle mennään (kuva 28). Hyvien radio-olosuhteiden vuoksi myös B7-taajuudella (PCell) päästiin erinomaiselle tasolle, joka oli keskimäärin -68 dBm. SCell1-soluna toimi 1800 MHz:n taajuusalue, jonka RSRP-tason keskiarvo oli -59 dBm ja SCell2-solulla (800 MHz) se oli -52 dBm.

Erinomaisten radio-olosuhteiden suuntaus jatkui myös SNR-arvojen kanssa, eikä muista lähettimistä aiheutunut juurikaan häiriötä tiedonsiirron aikana (kuva 29). Keskimääräiset SNR-arvot olivat: PCell-solussa 26 dB, SCell1-solussa 27 dB ja SCell2-solussa 31 dB. Näiden edellytyksien myötä myös kyettiin koko tiedoston lataamisen ajan käyttämään jokaisessa solussa 2x2 MIMO -tekniikkaa sekä 256QAM-modulaatiota.



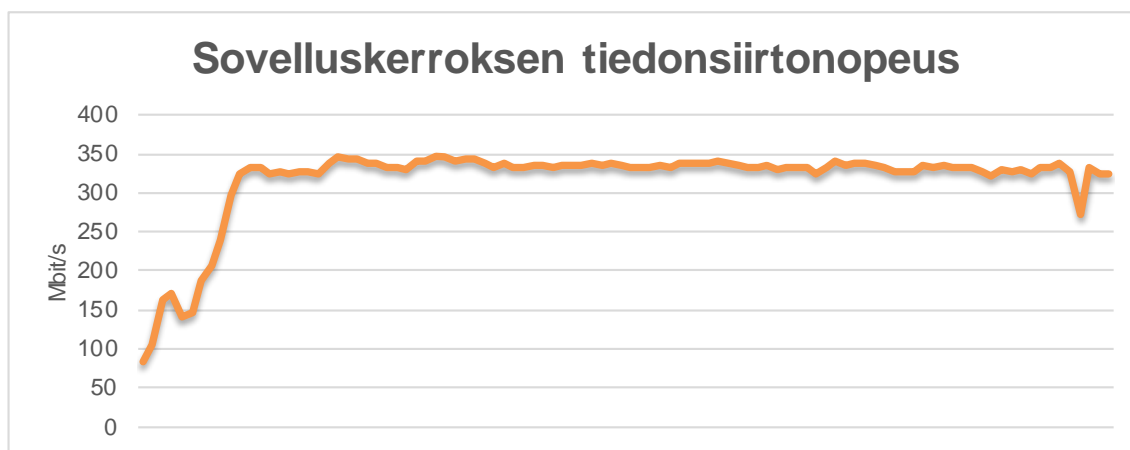
Kuva 29. SNR-arvot PCell-, SCell1- SCell2-soluissa.

PDSCH-tiedonsiirrossa on selkeästi huomattavissa kuinka PCell- sekä SCell1-solut kykenevät kaksinkertaiseen nopeuteen verrattuna puolet kapeamman kaistaleveyden omaavaan SCell2-soluun (kuva 30). Keskimäärin kantoaallot kykenivät seuraaviin fyysisen kerroksen nopeuksiin: PCell-solussa 135 Mbit/s, SCell1-solussa 134 Mbit/s ja SCell2-solussa 61 Mbit/s. Vastaavasti huippunopeudet taajuuksilla olivat seuraavanlaisia: PCell-solussa 149 Mbit/s, SCell1-solussa 144 Mbit/s ja SCell2-solussa 70 Mbit/s. Keskiarvoltaan kokonaistiedonsiirtonopeus fyysisellä kerroksella oli 327 Mbit/s ja huippunopeus 360 Mbit/s, joka jää loistavista radio-olosuhteista huolimatta merkittävästi teoreettisesta huippunopeudesta.



Kuva 30. Kolmen kantoaallon mittauksissa koetut fyysisen kerroksen tiedonsiirtonopeudet.

Sovelluskerroksen nopeudet jäivät heikompien PDSCH-kanavan nopeuksien myötä odotettua pienemmäksi, mikä tarkoitti tässä mittauksessa keskimäärin 317 Mbit/s nopeutta sekä huippunopeudeksi saatiin 346 Mbit/s (kuva 31). Näillä nopeuksilla 4 gigatavun tiedoston lataamiseen kului aikaa 1 minuutti sekä 39 sekuntia.



Kuva 31. Kolmella kantoaallolla suoritetun mittauksen tiedonsiirtonopeus sovelluskerroksessa.

### 5.3 Mittaustulosten arviointi

Kaikki mittaukset suoritettiin ideaalisissa radio-olosuhteissa sekä samana aamuna, jolloin myöskään tukiaseman kuormituksella ja radiorajapinnan liikenteellä ei ollut juurikaan vaikutusta mittaustuloksiin. Taulukossa 5 on listattuna jokaisen mittauksen tärkeimpiä parametreja, joilla on suoraa vaikutusta varsinaiseen tiedonsiirtonopeuteen. Mittauksista on selvästi nähtävissä taajuusalueiden yhteys vastaanotettaviin RSRP-tasoihin sekä signaali-kohinasuhteeseen (SNR).

Vaikka RSRP-tasot ja SNR-arvot olivat loistavia, MIMO-tekniikka käytössä sekä 256QAM-modulaatio, niin silti jäätin merkittävästi teoriassa saavutettavista PDSCH-kanavan tiedonsiirtonopeuksista. Puutteellisuus näkyi jo kantoaaltotasolla ja erityisesti 1CC- ja 2CC-mittauksissa, joissa PCell-solun käytössä oli myös 4x4 MIMO-tekniikka. 4x4 MIMO-tekniikan avulla teoriassa olisi pitänyt päästä kantoaaltokohtaisesti 391,6 Mbit/s PDSCH-kanavan DL-nopeuksiin. Tämän vuoksi nähtiin selvä ero DL 2CC- ja DL 3CC-mittausten välillä, vaikka teoriassa molemmilla kombinaatioilla pitäisi kyetä 489,5 Mbit/s nopeuteen.

Taulukko 5. Helsingissä suoritettujen suorituskymmittausten yhteenveto.

		Taa-juus (MHz)	Kais-tanle-veys (MHz)	MIMO	RSRP-kes-kiarvo (dBm)	SNR-kes-kiarvo	256QAM-modu-laation käyttö	PDSCH-huippu-nopeus (Mbit/s)	Sovel-lusker-roksen huip-puno-peus
DL 1CC	PCell	2600	20	4x4	-61	29 dB	93 %	246	239
	Total		20					246	239
DL 2CC CA	PCell	2600	20	4x4	-59	27 dB	73 %	219	
	SCell	800	10	2x2	-54	31 dB	100 %	72	
	Total		30					280	275
DL 3CC CA	PCell	2600	20	2x2	-68	26 dB	100 %	149	
	SCell1	1800	20	2x2	-59	27 dB	100 %	144	
	SCell2	800	10	2x2	-52	31 dB	100 %	70	
	Total		50					359	347

Kantaaalto-kohtaisista ongelmista huolimatta voitiin havaita CA-ominaisuuden suuri hyöty jatkuvasti kasvavan mobiiliverkon vaatimuksia vastaamaan. Kolmen kanta-aallon mittauksessa neljän gigatavun tiedosto pystyttiin lataamaan 1 minuutissa ja 39 sekun- nissa ilman 4x4 MIMO-tekniikkaa, aika on selvästi yli minuutin nopeampi verrattuna yh- dellä kanta-aallolla suoritettuun mittaukseen. Huomioitavaa on myös tässä aikavertai- lussa se, että 1CC-mittauksessa oli käytössä 4x4 MIMO -tekniikka, jolla pystytään tup- laamaan nopeus verrattuna 2x2 MIMO -tekniikkaan kanta-aallotasolla.

Vaikka tulokset jäivät kauas odotetuista tuloksista, niin mittaukset olivat kuitenkin hyvin tärkeitä, jotta voitiin havaita suorituskyvyn ongelma ja sitä kautta lähteä selvittämään juurisyitä. Ongelmakohta voisi esimerkiksi löytyä päätelaitteesta, tukiaseman paramet- reista tai vaihtoehtoisesti runkoverkon elementeistä. Myös vaatimukset päätelaitteiden suhteen voitiin nähdä rajallisten kaistakombinaatioiden ja niissä käytettävien MIMO-tek- niikoiden kautta. Mobiiliverkon toimivuuteen vaikuttaa hyvin moni tekijä, jotta haluttuihin tuloksiin päästään ja nämä käytännön mittaukset sen myös osoitti.

## 6 Yhteenveto

Insinööriyössä perehdyttiin Carrier Aggregation eli kantoaaltojen yhdistämisen mahdollistavia tekniikoita. Mobiililaajakaistan käyttö on kasvanut räjähdysmäisesti jo monta vuotta, minkä vuoksi työn aihe oli hyvin ajankohtainen. Neljännen sukupolven matkapuhelinteknologian (LTE) eri osa-alueet ja elementit tulivat tutuksi työssä sekä sille lisäominaisuuksia tarjoava LTE-Advanced (LTE-A). Merkittävimpänä lisänä LTE-A toi mukanaan kantoaaltojen yhdistämisen, jossa on myös työn pääpainopiste. Huomattavasti suurempia datansiirtonopeuksia tarjoavan CA-ominaisuuden lisänä myös muita tekniikoita tuli tutuksi, kuten MIMO-moniantennitekniikka sekä QAM-modulaatio, joilla on suora yhteys käyttäjien kokemaan eli sovelluskerroksen tiedonsiirtonopeuksiin. Kattava tutustuminen kantoaaltojen yhdistämisen teoriaan antoi loistavan pohjan käytännössä tehtyjä suorituskymmittauksia varten.

Suorituskymmittauksissa mitattiin kantoaaltojen yhdistämistä sekä kahdella että kolmella kantoaallolla ja vertailuna myös suoritettiin mittaus käyttämällä vain yhtä kantoaalloa. Vaikka mittauksissa ei päästy aivan haluttuihin tuloksiin tiedonsiirtonopeuden kannalta, niin siitä huolimatta onnistuttiin mainiosti todistamaan CA-ominaisuuden merkittävä hyöty mobiililaajakaistan käytössä. Tuloksien myötä kyetään havainnoimaan, kuinka kantoaaltojen yhdistämisellä päästään mobiiliverkon käyttäjien vaatimiin tiedonsiirtonopeuksiin. Teoriatietojen sisäistämällä yhdistettynä käytännössä tuotettuihin mittauksiin voitiin erottaa LTE-A-verkon toteutuksissa haasteita.

Ennestään melko vähäiseen mobiiliverkon tuntemukseen tuli insinööriyön myötä suurenmoista parannusta, josta on hyötyä myös tulevaisuudessa jatkuvasti kehittyvässä teknologiassa. Merkittävä tietotaidon lisääntyminen radiorajapinnassa toimivien ominaisuuksien sekä LTE-verkon toiminnan suhteen kertoo suotuisasti onnistuneesta työstä.



## Lähteet

- 1 ITU. ICT Facts and figures 2016. Verkkodokumentti. <<https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/ICTFactsFigures2016.pdf>> Luettu 27.10.2016.
- 2 Elisa. 2016. 4G jyrää – mobiilidatan käyttö huippulukemissa. <<http://www.uusi-teknologia.fi/2016/09/02/4g-jyraa-mobiilidatan-kaytto-huippulukemissa/>> Luettu 28.10.2016.
- 3 Harri Holma ja Antti Toskala. 2011. LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd.
- 4 Jaenette Wannstrom. 2013. LTE-Advanced. 3GPP. <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced> Luettu 28.10.2016.
- 5 3GPP. LTE. Verkkodokumentti. <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>> Luettu 31.10.2016.
- 6 Seppo Hämäläinen, Henning Sanneck ja Cinzia Sartori. 2012. LTE self-organising networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency. John Wiley & Sons, Ltd.
- 7 3GPP. IMS. Verkkodokumentti. <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/109-ims>> Luettu 3.11.2016.
- 8 Tutorialspoint. LTE Network Architecture. Verkkodokumentti. <[https://www.tutorialspoint.com/lte/lte\\_network\\_architecture.htm](https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm)> Luettu 11.11.2016.
- 9 Frédéric Firmin. 3GPP. The Evolved Packet Core. Verkkodokumentti. <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>> Luettu 11.11.2016.
- 10 Pierre Lescuyer ja Thierry Lucidarme. 2008. Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G and UMTS. John Wiley & Sons, Ltd.
- 11 Frédéric Firmin. 3GPP. NAS. Verkkodokumentti. <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/96-nas>> Luettu 20.11.2016.
- 12 Agilent Technologies. 3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA. Verkkodokumentti. <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7898EN.pdf>> Luettu 29.11.2016.
- 13 Harri Holma, Antti Toskala ja Jussi Reunanen. 2016. LTE Small Cell Optimization: 3GPP Evolution to Release 13. John Wiley & Sons, Ltd.

- 14 Ian Poole. Radio Electronics. What is QAM – Quadrature Amplitude Modulation. Verkkodokumentti. <<http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/quadrature-amplitude-modulation-qam/what-is-qam-tutorial.php>> Luettu 7.12.2016
  
- 15 LTE Advanced – 256QAM. Verkkodokumentti. <[www.sharetech-note.com/html/LTE\\_Advanced\\_256QAM.html](http://www.sharetech-note.com/html/LTE_Advanced_256QAM.html)> Luettu 9.12.2016.
  
- 16 Tutorialspoint. LTE Overview. Verkkodokumentti. <[https://www.tutorialspoint.com/lte/lte\\_quick\\_guide.htm](https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_quick_guide.htm)> Luettu 13.12.2016.
  
- 17 Sudeep Palat, Philippe Godin ja Matthew Baker. LTE Network Architecture. Alcatel-Lucent.
  
- 18 Ian Poole. Radio Electronics. LTE Physical, Logical and Transport Channels. Verkkodokumentti. <<http://www.radio-electronics.com/info/cellular-telecomms/lte-long-term-evolution/physical-logical-transport-channels.php>> Luettu 23.12.2016.
  
- 19 Ian Poole. Radio Electronics. 4G LTE Advanced Tutorial. Verkkodokumentti. <<http://www.radio-electronics.com/info/cellular-telecomms/lte-long-term-evolution/3gpp-4g-lte-advanced-tutorial.php>> Luettu 5.1.2017.
  
- 20 M. Kottkamp, A. Roessler, J Schlien. Rohde & Schwarz. LTE Advanced Technology Introduction White Paper. Verkkodokumentti. <[https://cdn.fswwwp.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma169/1MA169\\_3e\\_LTE-Advanced\\_technology.pdf](https://cdn.fswwwp.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma169/1MA169_3e_LTE-Advanced_technology.pdf)> Luettu 10.1.2017.
  
- 21 Ookla. 2016. Finland's Fastest Mobile Network: TeliaSonera Finland Oyj. Verkkodokumentti. <<https://www.sonera.fi/dam/jcr:06816c73-cb28-4617-bff6-6287c4422363/Ookla%20Speedtest%20report%2028102016.pdf>> Luettu 18.1.2017.
  
- 22 Ian Poole. Radio Electronics. 4G LTE CoMP, Coordinated Multipoint Tutorial. Verkkodokumentti. <<http://www.radio-electronics.com/info/cellular-telecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-comp-coordinated-multipoint.php>> Luettu 13.2.2017.
  
- 23 Jaenette Wannstrom, Keith Mallinson. 3GPP. HetNet/Small Cells. Verkkodokumentti. <<http://www.3gpp.org/hetnet>> Luettu 27.2.2017.
  
- 24 Ian Poole. Radio Electronics. Heterogeneous Cellular Networks, HetNet. Verkkodokumentti. <<http://www.radio-electronics.com/info/cellular-telecomms/heterogeneous-networks-hetnet/basics-tutorial.php>> Luettu 28.2.2017.

- 25 Jaenette Wannstrom. 3GPP. 2013. Carrier Aggregation explained. Verkkodokumentti. <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>> Luettu 21.3.2017.
- 26 Ian Poole. Radio Electronics. LTE CA: Carrier Aggregation Tutorial. Verkkodokumentti. <<http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-carrier-channel-aggregation.php>> Luettu 25.3.2017.
- 27 Niviuk. LTE Carrier Aggregation. Verkkodokumentti. <[http://niviuk.free.fr/lte\\_ca\\_band.php](http://niviuk.free.fr/lte_ca_band.php)> Luettu 29.3.2017.
- 28 Anritsu. Understanding LTE-Advanced. 2013. Verkkodokumentti. Luettu 2.5.2017.
- 29 Viestintävirasto. Radiolupapäätökset. 2017. Verkkodokumentti. <<https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/laitmaarayksetpaatokset/lupapaatokset/radiolupapaatokset.html>> Luettu 11.5.2017.
- 30 Rohde&Schwarz. Carrier Aggregation. (one) key enabler for LTE-Advanced. 2012. Verkkodokumentti. <[https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/Article\\_Carrier-aggregation.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/Article_Carrier-aggregation.pdf)> Luettu 21.5.2017.
- 31 Larry Miller. Qorvo. Carrier Aggregation Fundamentals for dummies. 2016. John Wiley & Sons, Inc.